ESTUDO SOBRE A QUALIDADE DA RESPOSTA DINÂMICA DO MÉTODO DE SUPERPOSIÇÃO DOS MODOS DE LANCZOS

CLÁUDIO BITTENCOURT FERREIRA

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL

Aprovada por:

Luiz Landau, D.Sc.
Presidente

Álvaro L.G.A. Coutinho, D.Sc.

Edison Castro Prates de Lima, D.Sc.

Andres Ludovico Halbritter, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 1990

FERREIRA, CLÁUDIO BITTENCOURT

Estudo Sobre a Qualidade da Resposta Dinâmica do Método de Superposição dos Modos de Lanczos [Rio de Janeiro] 1990.

X, 156 p. 29.7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 1990)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

1. Dinâmica Linear 2. Superposição Modal 3. Qualidade da Resposta Dinâmica I. COPPE/UFRJ II. Título (Série).

À minha paciente companheira Marta.

AGRADECIMENTOS

À Luiz Landau e Álvaro Coutinho pela orientação, persistência e paciência ao longo desses anos.

À minha família.

Ao amigo Paulo Maurício Videiro pelas sugestões, idéias e revisão do texto.

Resumo da Tese Apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

ESTUDO SOBRE A QUALIDADE DA RESPOSTA DINÂMICA DO MÉTODO DE SUPERPOSIÇÃO DOS MODOS DE LANCZOS

CLÁUDIO BITTENCOURT FERREIRA

Abril de 1990

Orientador: Luiz Landau

Programa: Engenharia Civil

O presente trabalho trata da qualidade da resposta dinâmica para o Método de Superposição dos Modos de Lanczos para estruturas submetidas a uma ampla faixa de períodos de excitação.

O desequilíbrio da equação de movimento, ou resíduo, quando da utilização da superposição modal (qualidade da resposta) foi avaliado a partir da definição de parâmetros globais.

A eficiência do Método de Superposição dos Modos de Lanczos em encontrar o equilíbrio da equação dinâmica foi verificada para uma ampla faixa de períodos de excitação abrangendo desde períodos acima do período natural da estrutura até os períodos modais mais inferiores alcançados nas análises.

Diversos critérios de parada na geração de vetores para a definição da base para a transformação de coordenadas foram

testados com o emprego do fator de participação de carga e massa efetiva. Também, vários algoritmos para a geração desses vetores, envolvendo diferentes processos de ortogonalização da base, foram testados.

Como conclusão, foram apresentados o comportamento, as limitações e precauções, resultantes deste estudo, quando da utilização do Método de Superposição dos Modos de Lanczos para os diversos períodos analisados, principalmente para os mais baixos. São também apresentadas conclusões sobre a utilização dos parâmetros de erro para a definição da qualidade da resposta dinâmica.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fullfilment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

STUDY ABOUT DYNAMIC RESPONSE QUALITY FOR SUPERPOSITION LANCZOS MODES METHOD

CLÁUDIO BITTENCOURT FERREIRA

April 1990

Thesis Supervisor: Luiz Landau

Department: Civil Engineering

In this work a study about a dynamic response quality for Lanczos Mode Superposition Method for structures submitted to large range of excitation periods is carried out.

The unbalanced equation of motion, or residual, was evaluated from global parameters to address the response quality of a modal superposition method with load-dependent basis generated by Lanczos-type algorithms.

The Lanczos Mode Superposition Method efficiency to find the dynamic equilibrium was verified for a large range of excitation periods including those above the natural period of structure until the lowest modal periods reached in the analysis.

Several cut-off criteria, for the generation of load-dependent vectors for the coordinate transformation, were tested with the use of load participation factor and an

effective mass. Also, several algorithms to the generation of differents processes of basis orthogonalization were tested.

As conclusion, were presented the behavior, limitations and cautions, resultants of this study, of the Lanczos Mode Superposition Method, for the several periods analysed, principally the lowest. Comments about the use of error parameters to the definition of dynamic response quality are also addressed.

ÍNDICE

Pág.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO 1

CAPÍTULO II

DEFINIÇÕES E CONCEITOS 8

II.1 - Conceitos gerais 8

II.2 - Algoritmos para geração da base dependente do carregamento 14

CAPÍTULO III

PROCEDIMENTOS PRELIMINARES 22

III.1 - Descrição 22

III.2 - Resultados e comentários 25

III.3 - Conclusões 59

CAPÍTULO IV

PROCEDIMENTOS AVANÇADOS 60

IV.1 - Descrição 60

IV.2 - Resultados e comentários 65

IV.3 - Conclusões 96

CAPÍTULO V

APLICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS AVANÇADOS PARA O PRIMEIRO MODELO. EXTENSÃO DA ANÁLISE PARA BAIXOS PERÍODOS DE EXCITAÇÃO 98

V.1 - Descrição 98

V.2 - Resultados e comentários 99

ÍNDICE

Pág.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES FINAIS 127

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 131

ANEXO "A" 134

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O problema dinâmico para grandes estruturas tem sido abordado de diversas formas, procurando-se sempre modelos matemáticos capazes de representar adequadamente o problema, bem como métodos numéricos eficientes e confiáveis. Através do Método dos Elementos Finitos as mais complexas estruturas podem ser discretizadas, resultando em modelos de boa aproximação e chegando a seguinte formulação da equação de movimento:

$$\underset{\sim}{M}\underset{\sim}{\ddot{u}} + \underset{\sim}{C}\underset{\sim}{\dot{u}} + \underset{\sim}{K}\underset{\sim}{u} = \underset{\sim}{P}(t) \ , \qquad \text{(I.1)}$$

onde:
- $\underset{\sim}{M}$ = matriz de massa
- $\underset{\sim}{C}$ = matriz de amortecimento
- $\underset{\sim}{K}$ = matriz de rigidez
- $\underset{\sim}{P}(t)$ = vetor de forças externas
- $\underset{\sim}{\ddot{u}}$ = vetor de acelerações
- $\underset{\sim}{\dot{u}}$ = vetor de velocidades
- $\underset{\sim}{u}$ = vetor de deslocamentos

Essa equação, do ponto de vista matemático, representa um sistema linear de equações diferenciais de segunda ordem, cuja solução pode ser obtida, a princípio, através de soluções conhecidas para equações diferenciais a coeficientes constantes. No entanto, devido às dimensões das matrizes, torna-se inviável a utilização de tal procedimento, obrigando a utilização de outras técnicas mais efetivas na análise por elementos finitos. Essas técnicas podem ser divididas em dois métodos de solução: integração direta e superposição modal.

A integração direta das equações de movimento é realizada passo-a-passo sem nenhuma transformação das equações. Objetiva-se a satisfação da equação de movimentos somente num intervalo de tempo Δt, resultando num equilíbrio que inclui os efeitos de inércia e amortecimento, em cada intervalo discreto de tempo. Além disso, baseia-se numa variação hipotética de deslocamentos, velocidades e acelerações dentro do intervalo Δt. A forma dessa variação é determinante da precisão, estabilidade e custo da solução. Os mais conhecidos métodos de integração direta são o Método da Diferença Central, Houbolt, Wilson θ e Newmark [8]. Em função do que já foi exposto a respeito do método, pode-se afirmar que, para um intervalo de integração apropriado, apresenta uma boa qualidade na sua resposta. Porém, para tempo de análise mais extenso e com o maior porte das estruturas normalmente de interesse para a análise dinâmica, torna-se inviável sua utilização generalizada.

Portanto, o método de Superposição Modal se apresenta como alternativa para solução do problema dinâmico com grande número de graus de liberdade. Este método baseia-se numa transformação de coordenadas adequada, de maneira a obtermos uma forma mais eficaz para a integração. Tal mudança consiste na troca da base das coordenadas dos elementos finitos para uma base de autovetores do problema de autovalor generalizado,

$$\underset{\sim}{K}\underset{\sim}{\phi}=\omega^2\underset{\sim}{M}\underset{\sim}{\phi} \qquad (I.2)$$

antes da integração no tempo. Como:

$$\underset{\sim}{u}=\underset{\sim}{\phi}\underset{\sim}{x} \qquad (I.3)$$

onde ϕ é a matriz de autovetores $\underset{\sim}{M}$-ortonormalizada, temos:

$$\ddot{\underset{\sim}{x}}+\Delta\dot{\underset{\sim}{x}}+\Omega^2\underset{\sim}{x}=\phi^T\underset{\sim}{P} \qquad (I.4)$$

onde: Ω^2 = matriz diagonal do quadrado dos autovalores do problema generalizado $(\omega^2{}_1,\ldots,\ \omega^2{}_n)$;

Δ = matriz diagonal de amortecimento, com $2\omega_i\xi_i$ onde ξ_i é a taxa de amortecimento crítico do $_i$ésimo modo.

Dessa maneira, tem-se a equação de movimento (I.4) desacoplada em "n" equações, que podem ser resolvidas pelos mais diversos métodos.

Como se vê, para a utilização desse método exige-se a solução do problema de autovalor, o que determina um grande esforço computacional. Originalmente, tem sido usada a matriz modal formada pelos autovetores do problema do autovalor associado às vibrações livres não amortecidas do sistema estrutural através de método iterativo (Método de Superposição Modal Clássico). Neste caso, para a determinação precisa dos efeitos localizados, associados aos altos modos de vibração, torna-se necessária uma correção. A parcela de carga negligenciada pela não inclusão dos altos modos pode ser avaliada por:

$$\underset{\sim}{P}_{n-m} = \underset{\sim}{P} - \underset{\sim}{P}_m \qquad (I.5)$$

onde $\underset{\sim}{P}_m$ é a parcela de carga representada pelos "m" modos.

Para uma relação elevada entre período de carregamento e período natural da estrutura, a contribuição dos altos modos é essencialmente estática. Assim, os deslocamentos correspondentes $\underset{\sim}{u}_{n-m}$ podem ser determinados como solução do problema estático levando-se em conta a parcela de carga negligenciada, descrita em (I.5), ao longo dos intervalos de tempo como a seguir:

$$\underset{\sim}{u}_{n-m}(t) = \underset{\sim}{K}^{-1}\ \underset{\sim}{P}_{n-m}(t) \qquad (I.6)$$

Tem-se, então, a resposta dinâmica calculada por:

$$\underset{\sim}{u}(t) = \phi\underset{\sim}{x}(t) + \underset{\sim}{u}_{n-m}(t) \qquad (I.7)$$

Uma outra transformação de coordenadas é baseada na construção de um conjunto de vetores ortogonais, por meio de algoritmo não-iterativo de Lanczos, o qual fornece uma aproximação de Rayleigh-Ritz para os autovalores e autovetores exatos [12-13]. O procedimento proposto por vários autores consiste em gerar uma base ortogonal que converge para os autovetores correspondentes aos autovalores da equação (I.2), através da seqüência de Krylov, partindo de um dado vetor inicial. Utilizando como vetor de partida o carregamento aplicado à estrutura, a correção pseudo-estática dos modos superiores é levada em consideração [1-7].

A vantagem destes métodos recai na obtenção da solução com a utilização de apenas alguns modos de vibração, reduzindo a complexidade do problema através de uma conveniente mudança de base do sistema de equações para uma base composta pelos autovetores associados aos modos de vibração obtidos; resultando em diminuição do número de equações e sistemas desacoplados.

Porém, essas vantagens obviamente não podem estar dissociadas da qualidade da resposta. A quantidade de modos de vibração necessários à obtenção de uma boa resposta, o intervalo de tempo e o tempo total da análise, bem como a influência do algoritmo na geração da base, representam questões importantes na qualidade da resposta.

No entanto, sempre se procurou a utilização de um indicador dessa qualidade, resultado do acerto ou não na

manipulação das variáveis acima. O fator de participação de carga aparentemente poderia ser esse indicador, já que fornece a representação espacial do carregamemto obtida pelos modos de vibração pedidos para a solução pelo Método de Superposição Modal.

Como o fator de participação de carga avalia "apenas" a representação espacial da resposta em termos das coordenadas modais, a qualidade da mesma será dependente do período de excitação de carga. Deste modo, é possível obter-se qualidades diferentes da resposta dinâmica para problemas com distintos períodos de excitação, apesar de apresentarem "idênticos" valores para o fator de participação de carga. Além disso, não pode ser esquecido que no problema dinâmico a representação da massa efetivamente envolvida na análise também é importante.

Os procedimentos para obtenção de uma qualidade mínima na resposta dinâmica, as limitações da superposição modal, a influência dos algoritmos na geração da base de vetores e a degeneração dos resultados em função dos períodos de excitação para o Método de Superposição dos Modos de Lanczos são objetivos desse estudo.

Para avaliação da qualidade, o cálculo do resíduo na resposta (desequilíbrio da equação dinâmica) para cada grau de liberdade e, associado a este, o erro na resposta dinâmica ao longo do tempo, foram utilizados para a obtenção de parâmetros globais de comportamento estrutural. Para o entendimento desses parâmetros, os modelos utilizados foram submetidos a Método de Integração Direta para comparação de deslocamentos e acelerações (em graus de liberdade com alto

valor de resíduo) e esforços em elementos significativos (próximos a aplicação dos carregamentos), com o Método de Superposição Modal dos Vetores de Lanczos.

Também foram estudados algoritmos diferentes para geração de vetores de Lanczos, envolvendo ortogonalização plena ou parcial, e critérios de parada na geração dessa base em função do período do carregamento, para a definição de procedimentos e algoritmos recomendáveis.

Os modelos utilizados como exemplos são plataformas de exploração marítima de petróleo. O primeiro trata-se de um modelo simplificado com características geométricas induzindo a elevada rigidez e simetria simulada pelas condições de contorno. O segundo modelo é uma plataforma real com simulação do convés. Para ambos os casos foi adotado um carregamento senoidal.

Todos os programas utilizados para análise dinâmica nesse estudo foram adaptados para o ambiente de um computador pessoal PC-XT a partir de rotinas anteriormente desenvolvidas e usadas em computador de grande porte. A entrada de dados foi modificada para permitir integração com o programa SAECHIP [11] de maneira a executar todas as facilidades já existentes neste, tais como verificação da consistência de dados, geração automática de dados, plotagem da geometria e modos de vibração, etc. A saída de dados também foi alterada, particularizando-a para pórticos espaciais.

Para o cálculo de resíduos e erros criou-se um pós-processador que se utiliza das informações recém-calculadas, tais como matrizes de massa e rigidez, autovetores, deslocamentos e acelerações (nas coordenadas dos autovetores)

e carregamento espacial.

No próximo capítulo serão fornecidas as definições e conceitos a serem empregados, bem como a descrição dos algoritmos e critérios de parada na geração da base.

No terceiro capítulo será apresentada a evolução e os resultados das análises para a primeira estrutura marítima mencionada anteriormente. Partindo dos procedimentos usualmente adotados e aplicando conceitos preliminares de correção, de forma a definir uma abordagem a ser aplicada no segundo exemplo.

No quarto capítulo, em função das experiências com o exemplo anterior, foram testados os algoritmos mais significativos e implementados novos testes, com outros critérios de parada mais exigentes e novos algoritmos, para o segundo modelo, mencionado anteriormente, com características distintas do primeiro. Com isso, os procedimentos utilizados anteriormente puderam ser comparados com esse novo exemplo em termos de comportamento dos parâmetros de erro (Erro Médio, Desvio do Erro e Máximo Resíduo) e eficiência de algoritmos.

No quinto capítulo, uma extensão das análises para a estrutura do terceiro capítulo foi realizada para períodos mais baixos, de forma a se obter a confirmação dos fatos observados e verificar o funcionamento dos algoritmos e dos procedimentos.

As conclusões finais, recomendações, sugestões e limites são apresentados no último capítulo.

Os diversos modos de vibração dos vários algoritmos usados e a geometria dos dois modelos são apresentados no ANEXO "A".

CAPÍTULO II

DEFINIÇÕES E CONCEITOS

Neste capítulo são formalizadas algumas definições e conceitos de indicadores, parâmetros e critérios de paradas, bem como são descritos os diversos algoritmos de geração da base utilizados.

II.1 - Conceitos gerais:

- Fator de Participação de Cargas:

Relacionado à representação espacial do vetor de cargas pelos autovetores do problema dinâmico, sendo, portanto, função da quantidade e qualidade dos vetores da base de Lanczos. Segundo formulação apresentada em JOO, K.-J. et al [2], a distribuição espacial do vetor de cargas pode ser descrita como:

$$\underset{\sim}{P} = \underset{\sim}{\phi}\ \underset{\sim}{\alpha} \qquad \text{(II.1)}$$

onde $\underset{\sim}{\alpha}$ é a amplitude para as novas coordenadas generalizadas e $\underset{\sim}{\phi}$ é a matriz de transformação das coordenadas generalizadas para as coordenadas do carregamento $\underset{\sim}{P}$.

Aplicando a ortogonalização da massa na equação (II.1), temos:

$$\underset{\sim}{\alpha} = \underset{\sim}{P}^T\ \underset{\sim}{M}\ \underset{\sim}{\phi} \qquad \text{(II.2)}$$

tendo como componente para o $_i$-ésimo modo

$$\underset{\sim}{\alpha}_i = \underset{\sim}{P}^T\ \underset{\sim}{M}\ \underset{\sim}{\phi}_i \qquad \text{(II.3)}$$

Portanto, o fator de participação da carga associado a cada modo, levando em conta a representação do carregamento expressa em (II.3), pode ser descrito da seguinte forma:

$$\eta_i = \underset{\sim}{\alpha}_i^t \, \underset{\sim}{\alpha}_i \, / \, (\underset{\sim}{P}^t \, \underset{\sim}{P}) \qquad \text{(II.4)}$$

Para o fator de participação de carga total temos:

$$\eta = \sum_{i=1}^{N} \eta_i \qquad \text{(II.5)}$$

sendo que para $\eta = 1.0$ todo o carregamento aplicado à estrutura se encontra espacialmente representado pela transformação de coordenadas.

Da mesma forma, podemos falar em erro total na representação do carregamento como:

$$\epsilon = 1-\eta \qquad \text{(II.6)}$$

- Massa Efetiva:

Similar ao fator de participação de carga, a massa efetiva indica a representação da massa da estrutura no problema modal. Sua origem conceitual está descrita em CLOUGH <u>et al</u> [9] e está associada ao conceito de excitação de base, onde a abordagem das coordenadas generalizadas pode ser usada efetivamente na análise de terremotos. Partindo da equação de movimento (I.1), e admitindo um sistema de massa discreta e a excitação nos apoios descrita como uma função escalar no tempo g(t), pode-se re-escrever que:

$$\underset{\sim}{M}\ddot{\underset{\sim}{u}} + \underset{\sim}{C}\dot{\underset{\sim}{u}} + \underset{\sim}{K}\underset{\sim}{u} = \underset{\sim}{P}eff \ , \qquad (II.7)$$

sendo $\underset{\sim}{P}eff$ o vetor de força efetiva, descrito como:

$$\underset{\sim}{P}eff = -[(\underset{\sim}{M}\underset{\sim}{1}_s+\underset{\sim}{M}_g)\ddot{g}+(\underset{\sim}{C}\underset{\sim}{1}_s+\underset{\sim}{C}_g)\dot{g}+(\underset{\sim}{K}\underset{\sim}{1}_s+\underset{\sim}{K}_g)g] \qquad (II.8)$$

onde: $\underset{\sim}{M}_g$, $\underset{\sim}{C}_g$ e $\underset{\sim}{K}_g$ representam inércia, amortecimento viscoso e elasticidade acopladas a forças desenvolvidas nos graus de liberdade ativos dos suportes com movimentos; e

$\underset{\sim}{1}_s$ é o vetor com os coeficientes de influência que representam os deslocamentos correspondentes a um deslocamento unitário nos suportes.

Em função dos pequenos valores de amortecimento, a parcela do amortecimento devido ao movimento de apoio pode ser negligenciada e a parcela relativa à elesticidade é nula. Portanto temos:

$$\underset{\sim}{P}eff = -(\underset{\sim}{M}\underset{\sim}{1}_s)\ddot{g} \qquad (II.9)$$

Após a transformação de coordenadas para o sistema modal, tem-se "n" equações desacopladas cujos termos referentes à excitação da base pode ser descrito (negligenciando-se o sinal negativo) como:

$$P_n = \underset{\sim}{\phi}_n^T \ \underset{\sim}{P}eff = \underset{\sim}{\phi}_n^T \ \underset{\sim}{M}\underset{\sim}{1}_s \ \ddot{g} = \beta_n \ \ddot{g} \qquad (II.10)$$

$$\text{onde } \beta_n = \underset{\sim}{\phi}_n^T \ \underset{\sim}{M}\underset{\sim}{1}_s \qquad (II.11)$$

é denominado fator modal de excitação de terremoto. A massa total atuante devido ao movimento dos apoios, de um sistema estrutural com massas discretas, pode ser representada por:

$$\underset{\sim}{1}_s^T \ \underset{\sim}{M} \ \underset{\sim}{1}_s = \sum_{n=1}^{N} M_n^{eff} \qquad (II.12)$$

Dessa forma, pode-se afirmar que M_n^{eff} é a massa efetiva

para o $_n$-ésimo vetor da base e é fisicamente equivalente à reação nos suportes para o $_n$-ésimo vetor da base na aceleração unitária espectral. Assim, o fator de massa efetiva modal é definido por:

$$\xi_n = M_n^{eff} / \sum_{n=1}^{N} M_n^{eff} \qquad \text{(II.14)}$$

e como participação total da massa

$$\xi_L = \sum_{n=1}^{L} \xi_n \qquad \text{(II.15)}$$

onde ξ_L aumenta monotonamente conforme L aumenta.

Os mesmos conceitos podem ser utilizados para o caso de carregamento aplicado externamente.

-Resíduos, Erro Médio e Desvio do Erro:

Resíduo é a parte de desequilíbrio da equação dinâmica em cada grau de liberdade da estrutura em cada intervalo de tempo, de tal forma que temos:

$$\underset{\sim}{R} = \underset{\sim}{P} - \underset{\sim}{K}\underset{\sim}{\phi}\underset{\sim}{X} - \underset{\sim}{M}\underset{\sim}{\phi}\ddot{\underset{\sim}{X}} \qquad \text{(II.16)} \ ,$$

nesse caso, tendo se negligenciado a parcela devida ao amortecimento.

A partir dessa definição de resíduo, evoluiu-se para um parâmetro mais simples e resumido, com abrangência global, indicativo da qualidade da resposta. O erro em cada intervalo de tempo da análise é definido por:

$$E_t = \sqrt{\underset{\sim}{R}^2} \qquad \text{(II.17)} \ ,$$

ou seja, a normalização absoluta do resíduo.

Além disso, foram definidos o erro médio e o desvio do erro como parâmetros globais não só em termos da estrutura, como também em relação ao tempo total analisado. Portanto, temos:

$$E_m = \left(\sum_{t=1}^{n} E_t \right) / n \qquad \text{(II.18)}$$

$$E_v = \left(\sum_{t=1}^{n} (E_t - E_m)^2 \right) / (n-1) \qquad \text{(II.19)} ,$$

onde: n é o número de intervalos, E_m é o Erro Médio e E_v é o Desvio do Erro

Com esses dois parâmetros e o máximo resíduo encontrado (juntamente com a identificação do grau de liberdade e intervalo de tempo em que ocorreu), foi encaminhado o estudo comparativo entre as diversas análises. No entanto, sempre que houver interesse, maiores informações serão fornecidas sobre as análises, de forma a permitir uma adequada avaliação dos próprios parâmetros.

-Carregamentos:

Nesse estudo foram empregados apenas carregamentos senoidais sem defasagens. A preocupação na escolha dos ciclos dos carregamentos foi varrer uma larga faixa de períodos, principalmente na região abaixo do período natural da estrutura, até atingir o período mais baixo alcançado na representação modal, coincidindo com os períodos modais representados.

Com esse procedimento, procurou-se apresentar o limite

da capacidade dos algoritmos usados, bem como estudar a melhor abordagem possível para os diversos períodos de excitação aos quais a estrutura foi submetida.

-Amortecimento:

Procurou-se a utilização de percentuais de amortecimento crítico entre 0 e 0.5% (primeiro e segundo exemplo, respectivamente) de forma a acentuar aspectos na resposta dinâmica, tais como ressonâncias, erros na resposta, etc.

II.2 - Algoritmos para geração da base dependente do carregamento:

Basicamente foram três os algoritmos para geração da base empregados nesse estudo, todos tendo como vetor de partida o carregamento. Cada um foi testado quanto a influência dos resultados para os diversos períodos de excitação.

Os três algoritmos são basicamente de dois tipos em relação ao critério de ortogonalização:

-Ortogonalização do último vetor em relação aos dois anteriores; e

-Ortogonalização do último vetor em relação a todos os vetores anteriormente gerados.

O primeiro tipo (ALGORITMO II.1) foi implementado conforme proposto por COUTINHO, A.L.G.A. et al. [1] e foi denominado, nesse estudo, de "Algoritmo Original", por ser o algoritmo tradicionalmente empregado para a geração de vetores formadores da base para a Superposição Modal. É indicado para trabalhar apenas com um pequeno número de vetores na formação da base, devida a não manutenção da ortogonalidade da base.

O segundo tipo apresenta duas variações, ambas foram implementadas conforme sugerido por JOO, K.-J. et al. [2]. A primeira variação (ALGORITMO II.2) tem a numeração 08 (na citada referência acima) e apresenta a forma original para a geração dos vetores de Ritz $\underset{\sim}{M}$-ortonormais. A iteração utilizada para achar os vetores $\underset{\sim}{M}$-ortonormais de Ritz é ma-

tematicamente similar ao algoritmo de Lanczos uma vez que ambos atendem ao subespaço de Krylov. A ortogonalização utilizada nesse caso é Gram-Schmidt.

A segunda variação (ALGORITMO II.3) é fundamentada na sugestão do algoritmo 10 da mesma referência [2]. Como a ortogonalização de Gram-Schmidt é tida como instável, originando vetores linearmente dependentes, portanto com perda da ortogonalidade da base, busca-se remediar essa instabilidade utilizando uma atualização do vetor estático no lugar do vetor de Ritz anterior para a geração do próximo vetor. Essa atualização é realizada a cada iteração (maiores detalhes podem ser observados no próprio ALGORITMO II.3).

Uma outra alternativa com base no algoritmo anterior e denominado Algoritmo 10 Modificado foi testada e apresenta uma menção apenas nesse estudo. A modificação consistia na supressão de alguns passos intermediários do algoritmo anterior, na tentativa de diminuir o esforço computacional sem perder a ortogonalização da base. Porém, como esse objetivo não foi alcançado, esse algoritmo foi abandonado nas demais análises após o teste inicial, realizado com o segundo modelo.

ALGORITMO II.1

Triangularização: $\underset{\sim}{K} = \underset{\sim}{L}\ \underset{\sim}{D}\ \underset{\sim}{L}^t$

Redução:

$$\underset{\sim}{K}\underset{\sim}{u}_1 = \underset{\sim}{f}$$

$$\beta_1 = (\underset{\sim}{u}_1^t\ \underset{\sim}{M}\ \underset{\sim}{u}_1)^{1/2}$$

$$\underset{\sim}{x}_1 = \underset{\sim}{u}_1 \ / \ \beta_1$$

$$\beta_1 = 0$$

Para $j=2,\ldots,m$

$$\underset{\sim}{K}\underset{\sim}{u}_j = \underset{\sim}{M}\underset{\sim}{x}_{j-1}$$

$$\alpha_j = \underset{\sim}{u}_j^t\ \underset{\sim}{M}\underset{\sim}{x}_{j-1}$$

Ortogonalização:

$$\underset{\sim}{u}_j = \underset{\sim}{u}_j - \alpha_j\ \underset{\sim}{x}_{j-1}$$

$$\underset{\sim}{u}_j = \underset{\sim}{u}_j - \beta_{j-1}\ \underset{\sim}{x}_{j-2}$$

$$\beta_j = (\underset{\sim}{u}_j^t\ \underset{\sim}{M}\ \underset{\sim}{u}_j)^{1/2}$$

$$\underset{\sim}{x}_j = \underset{\sim}{u}_j \ / \ \beta_j$$

Projeção da Matriz de Rigidez no subespaço : $\bar{\underset{\sim}{K}} = \underset{\sim}{X}^t\ \underset{\sim}{K}\ \underset{\sim}{X}$;

onde $\underset{\sim}{X}=[\ \underset{\sim}{x}_1, \underset{\sim}{x}_2, \ldots, \underset{\sim}{x}_m\ ]$

ALGORTIMO II.2

Triangularização: $\underset{\sim}{K} = \underset{\sim}{L}\ \underset{\sim}{D}\ \underset{\sim}{L}^t$

Redução:

$\underset{\sim}{K}\underset{\sim}{u}_1 = \underset{\sim}{f}$

$\beta_1 = (\underset{\sim}{u}_1^t\ \underset{\sim}{M}\ \underset{\sim}{u}_1)^{1/2}$

$\underset{\sim}{x}_1 = \underset{\sim}{u}_1 / \beta_1$

Para $i=2,\ldots,m$

$\underset{\sim}{K}\underset{\sim}{u}_i = \underset{\sim}{M}\underset{\sim}{x}_{i-1}$

Para $j=1,\ldots,i-1$

$c_j = \underset{\sim}{x}_j^t\ \underset{\sim}{M}\underset{\sim}{u}_i$

Ortogonalização: $\underset{\sim}{u}_i = \underset{\sim}{u}_i - c_j\underset{\sim}{x}_j$

$\beta_i = (\underset{\sim}{u}_i^t\ \underset{\sim}{M}\ \underset{\sim}{u}_i)^{1/2}$

$\underset{\sim}{x}_i = \underset{\sim}{u}_i / \beta_i$

Projeção da Matriz de Rigidez no subespaço : $\bar{\underset{\sim}{K}} = \underset{\sim}{X}^t\ \underset{\sim}{K}\ \underset{\sim}{X}$;

onde $\underset{\sim}{X}=[\ \underset{\sim}{x}_1,\underset{\sim}{x}_2,\ldots,\underset{\sim}{x}_m\ ]$

ALGORITMO II.3

Triangularização: $\underset{\sim}{K} = \underset{\sim}{L}\ \underset{\sim}{D}\ \underset{\sim}{L}^t$

Redução:

$\underset{\sim}{K}\underset{\sim}{u}_1 = \underset{\sim}{f}$

$\underset{\sim}{K}\underset{\sim}{x}_1^* = \underset{\sim}{M}\underset{\sim}{u}_1$

$\beta = (\underset{\sim}{x}_1^{*t}\ \underset{\sim}{M}\ \underset{\sim}{x}_1^*)^{1/2}$

$\underset{\sim}{x}_1 = \underset{\sim}{x}_1^* / \beta$

Para $i=2,\ldots,m$

Atualização do : Vetor estático

$\alpha_{i-1} = \underset{\sim}{x}_{i-1}^t\ \underset{\sim}{M}\underset{\sim}{u}_{i-1}$

$\underset{\sim}{u}_i = \underset{\sim}{u}_{i-1} - \alpha_{i-1}\underset{\sim}{x}_{i-1}$

$\underset{\sim}{K}\underset{\sim}{x}_i^* = \underset{\sim}{M}\underset{\sim}{u}_i$

Para $j=1,\ldots,i-1$

$c_j = \underset{\sim}{x}_j^t\ \underset{\sim}{M}\underset{\sim}{x}_i^*$

Ortogonalização:

$\underset{\sim}{x}_i^* = \underset{\sim}{x}_i^* - c_j\underset{\sim}{x}_j$

$\beta_i = (\underset{\sim}{u}_i^t\ \underset{\sim}{M}\ \underset{\sim}{u}_i)^{1/2}$

$\underset{\sim}{x}_i = \underset{\sim}{x}_i^* / \beta_i$

Projeção da Matriz de Rigidez no subespaço : $\bar{\underset{\sim}{K}} = \underset{\sim}{X}^t\ \underset{\sim}{K}\ \underset{\sim}{X}$;

onde $\underset{\sim}{X}=[\ \underset{\sim}{x}_1, \underset{\sim}{x}_2, \ldots, \underset{\sim}{x}_m\ ]$

-Critérios de parada na geração da base e vetores adicionais

Foram vários os critérios de parada usados durante as análises. Inicialmente o número dos vetores componentes da base era pré-determinado externamente ao programa e usado como limitador da base, independendo do que poderia ocorrer com a resposta. Assim, dependendo do algoritmo, da estrutura e do período de excitação, se o número escolhido fosse elevado, além do esforço computacional maior, seria possível atingir-se um fator de participação de carga (ou massa efetiva por direção) maior que 1.0 , indicando perda de ortogonalidade na base. Se o número fosse baixo, a representação modal poderia ficar muito pobre.

Baseado na referência [4], alterou-se o critério de forma a se garantir uma qualidade mínima na resposta através da existência de um número adequado de vetores na base. Passou-se a utilizar os conceitos de erro na representação do carregamento e da massa efetivamente usada na análise. Com isso, algumas variações foram criadas conforme pode ser observado na TABELA II.1, onde objetiva-se alcançar uma das restrições apresentadas por critério.

TABELA II.1

CRITÉRIO	DENOMINAÇÃO	RESTRIÇÕES: ERRO CARREG.	MASSA EFET. X	MASSA EFET. Y	MASSA EFET. Z	No.VET.
0	Original	-		-		≤ NV
1	Sem correção	< 0.10		> 0.90		≤ NV
2a	Com correção	< 0.10		> 0.90		≤ NV+1
2b	Com corr(5%erro)	< 0.05		> 0.95		≤ NV
3	Com correção(HP)	< 0.00		> 1.00		≤ NV
4	Algoritmo 08	< 0.001		> 0.999		≤ NV
5	Algoritmo 10	< 0.001		> 0.999		≤ NV

onde NV é o número máximo de vetores definido externamente ao programa.

Procedimentos usados:

- Para o Critério 2a foi utilizado o ALGORITMO II.1 e após atingir alguma das restrições foi acrescido mais um vetor oriundo da atualização do vetor estático como correção, de maneira a melhorar a base de vetores, aumentando tanto o fator de participação, quanto a massa efetiva. Esta atualização do vetor estático teve como base a referência [4] e foi implementado da seguinte forma:

Após a geração do último vetor: $\underset{\sim}{x}_b$

$$\underset{\sim}{K}\underset{\sim}{u}^* = \underset{\sim}{M}\underset{\sim}{x}_b$$
$$\alpha = \underset{\sim}{u}^* \underset{\sim}{M} \underset{\sim}{x}_b$$
$$\underset{\sim}{u}^* = \underset{\sim}{u}^* - \alpha\underset{\sim}{x}_b$$
$$\beta = (\underset{\sim}{u}^{*t} \underset{\sim}{M} \underset{\sim}{u}^*)^{1/2}$$
$$\underset{\sim}{x}_{b+1} = \underset{\sim}{u}^* / \beta$$

- Para o Critério 3 o procedimento adotado foi a geração de vetores, com o ALGORITMO II.1, até atingir-se erro na representação do carregamento < 0.0 e/ou massa efetiva em alguma das direções (X, Y ou Z) >1.00. A seguir, o último vetor gerado, responsável por esses valores de erro/massa efetiva (portanto não ortogonal a base), é descartado, de maneira a possibilitar que com o menor erro (porém maior que 0.0) e/ou maior massa efetiva (porém menor que 1.0) obtenha-se o maior número de vetores, provocando o esgotamento da base para esse algoritmo de geração. As letras HP ("high performance") servem para definir o esgotamento da base para o algoritmo.

- Os Critérios 4 e 5 adotaram os ALGORITMOS II.2 e II.3, respectivamente, até atingirem as restrições impostas no critério.

A preocupação na aplicação dos critérios de parada em relação aos diversos períodos de excitação foi o de determinar uma faixa, em relação ao período natural da estrutura ou dos períodos modais, em que uma exigência maior em relação à base de vetores se faz necessária.

CAPÍTULO III

PROCEDIMENTOS PRELIMINARES

III.1 - Descrição:

A denominação "Procedimentos Preliminares" visa englobar a seqüência das análises que passam do procedimento dito clássico, com seleção da quantidade de vetores e algoritmo de ortogonalização parcial, até o emprego de critério de parada com tentativa de adotar uma correção que melhorasse os resultados.

Modelo:

Foi utilizado o mesmo modelo estrutural da referência [1]. O pórtico espacial com 132 graus de liberdade, com a representação das estacas e solo adjacente (através de molas lineares conectadas aos pontos nodais da estaca). As principais características geométricas podem ser vistas no ANEXO "A". Foi dada a mesma denominação da referência [1] a esta estrutura: PLAT3. Nenhum amortecimento foi considerado na análise dinâmica.

O carregamento senoidal de amplitude total de 2120, foi aplicado na direção global "Y" da seguinte forma:

nó	amplitude
9	1085
10	300
14	650
15	85

Procedimentos:

Com o intuito de estudar o comportamento para os diversos procedimentos, iniciou-se a pesquisa com a determinação do número de vetores componentes da base e a geração dos vetores sendo feita pelo ALGORITMO II.1. Inicialmente a base foi formada por 3 vetores, alcançando um fator de participação de carga (F.P.C.) de 0.6747 e massa efetiva global em torno de 20.4% (para a direção "Y": 50.3%). A razão da opção de 3 vetores deveu-se a um teste inicial para esse modelo, com período de excitação $\bar{T}$=3.0s (acima do período natural da estrutura de 2.4s), em que foram comparados os resultados obtidos para todos os graus de liberdade com o Método de Integração Direta (Newmark). Essa comparação demonstrou que os resultados oriundos da utilização de 3 vetores na base apresentaram-se muito bem para essa excitação.

O segundo passo foi introduzir uma atualização do vetor estático, conforme descrito no Capítulo II para o Critério 2a de parada (porém sem a exigência de valores mínimos para erro de carregamento e/ou massa efetiva), obtendo assim um quarto modo, F.P.C. de 0.7654 e massa efetiva global de 21.6%. A faixa de períodos de excitação escolhidos para serem analisados abrange a região pouco acima do período natural da

estrutura até próximo do último período modal obtido nas análises. Dessa forma, para os dois procedimentos acima descritos, foram adotados para $\bar{T}$= 10.0, 6.0, 2.4, 1.0 e 0.5s.

Buscando estudar o comportamento dos resultados para uma base mais rica, foram exigidos 6 modos atingindo-se um F.P.C. de 0.9036 e massa efetiva global de 20.9%, sendo esse o 1º critério de parada simples conforme descrito no Capítulo II. Em seguida, aplicou-se a atualização do vetor estático chegando-se ao 7º modo, com F.P.C. de 0.9041 e massa efetiva global de 22.5% configurando-se, então, o critério de parada 2a. A definição dos períodos de excitação para as análises continuou sendo a mesma descrita no parágrafo anterior. Como foram alcançados períodos modais mais baixos, aprofundou-se a pesquisa para os valores dos períodos modais coincidentes $\bar{T}$= 1.10, 0.70, 0.46, 0.35, 0.20 e 0.10s (como pode ser observado na TABELA III.2), além dos previamente analisados.

Nesse ponto, acrescentou-se uma pesquisa para os períodos de excitação mais baixos em relação ao intervalo de tempo da análise e a quantidade de ciclos envolvidos (duração total da análise).

Por último, exigiu-se mais do critério de parada para o caso convencionado de "Com correção". Ao invés da atualização do vetor estático, que não conseguiu aumento significativo nos valores de massa efetiva e/ou fator de participação de carga, prosseguiu-se na busca de mais modos até o limite mínimo de 5% de erro para carga, e/ou mínimo de 95% de massa efetiva por direção conforme Critério 2b (TABELA II.1), obtendo-se 7 modos com F.P.C. de 0.9600 e massa efetiva global em torno de 20%.

III.2 - Resultados e comentários:

O conjunto completo de tabelas e gráficos encontra-se ordenado no final deste item. Os gráficos mais significativos foram inseridos ao longo do texto.

De maneira a fornecer uma visão global dos resultados, a TABELA III.1 apresenta o resumo com a evolução do erro em função do tipo de análise e período de excitação. Juntamente com a TABELA III.2, onde são apresentados os períodos, fatores de participação de carga e massa efetiva (global e por direção) para os casos analisados permitindo uma comparação entre a evolução das análises e seus resultados.

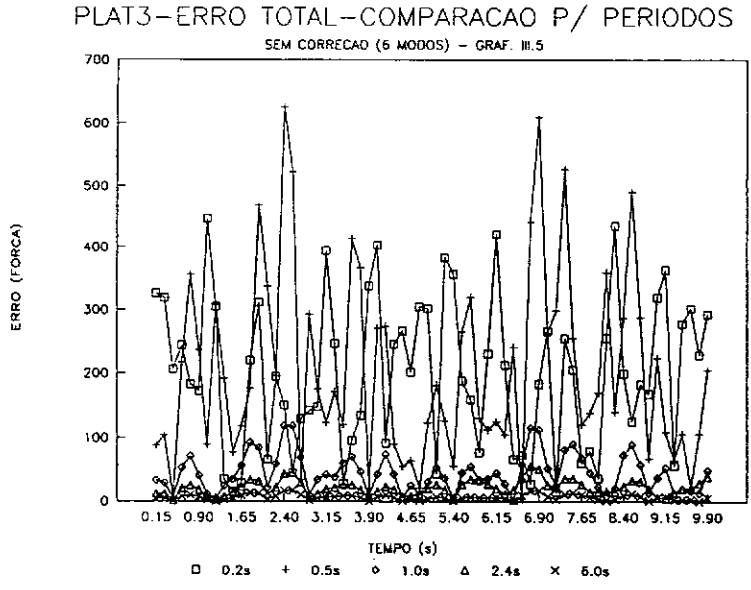
Preliminarmente, a escolha de 3 modos de vibração para a análise foi fundamentada em bons resultados apresentados para o caso $\bar{T}$=3.0s, tanto pelos parâmetros de erro como pela comparação da resposta com os resultados do método de integração direta (Newmark) para deslocamentos, acelerações e esforços.

Em seguida, através da evolução dos resultados para esses mesmos 3 modos para os diversos períodos de excitação, pode-se afirmar que seu uso se mostra bastante pobre, mesmo com F.P.C. próximo de 0.70, para períodos mais baixos. Ao valer-se da atualização do vetor estático neste caso, verificou-se melhoria apenas no último período pesquisado com esses modos ($\bar{T}$=0.5s) (ver TABELA III.1).

A busca por mais modos ofereceu uma melhoria significativa e alcançou períodos modais mais baixos (até ~0.1s), quando usou-se o Critério 1 (obtendo-se 6 modos) e Critério 2a (7 modos) ambos descritos na TABELA II.1. Dessa forma, o

F.P.C. aumentou de forma significativa (~0.90), porém sem grandes diferenças entre os casos "Sem correção" e "Com correção", sendo, neste caso, a correção feita pela atualização do vetor estático.

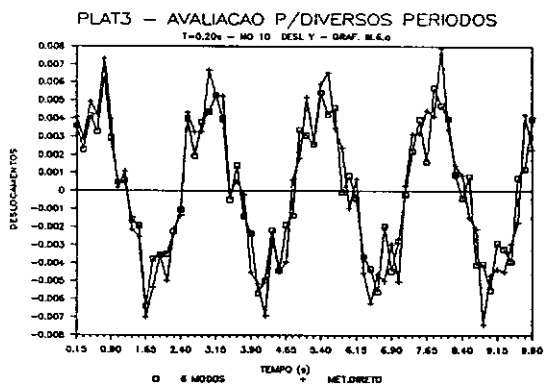
Esse fenômeno se reflete nos erros, deslocamentos, acelerações, etc, como se pode visualisar no GRÁFICO III.5 a seguir, onde são apresentados os erros para diversos períodos de carga para 6 modos (5% erro). É visível um aumento no valor do erro para períodos de carga mais baixos.

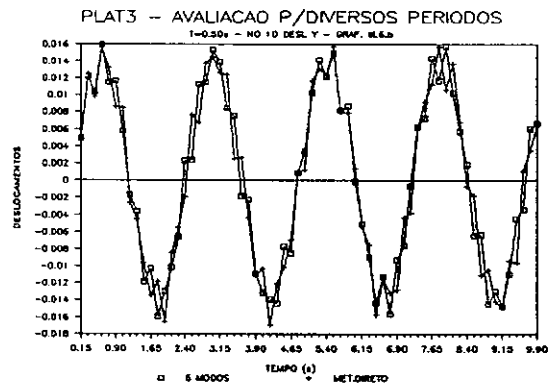


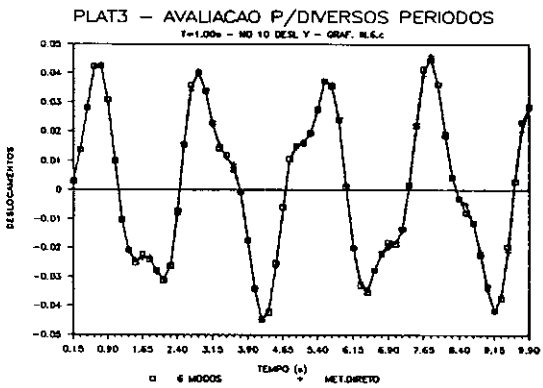
Uma avaliação dos resultados obtidos com os 6 modos, em relação ao método de integração direta, pode ser vista nos GRÁFICOS III.6, que mostram a evolução ao longo do tempo da aceleração e deslocamento (na direção global "Y") para o nó 10 para os diversos períodos de carga. Nesse caso se constata que, de forma similar ao apresentado para os erros e resíduos, esses apresentam diferenças mais significativas para os períodos de carga mais baixos, principalmente para as

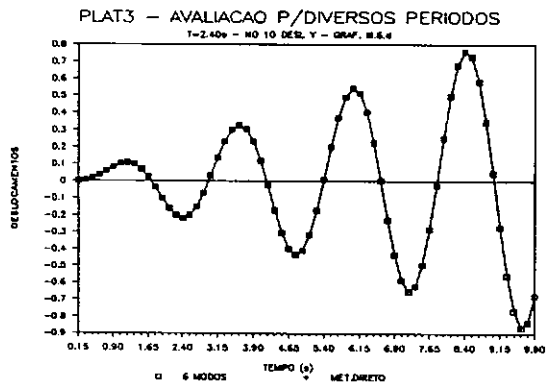
acelerações. Aí, a conjunção dos valores altos das acelerações com as discrepâncias nos valores entre resultado equilibrado e aproximado pelo Método de Superposição Modal, pode se tornar significativo no cálculo do erro e, portanto, na solução de equilíbrio obtida, de acordo com o modelo em análise.

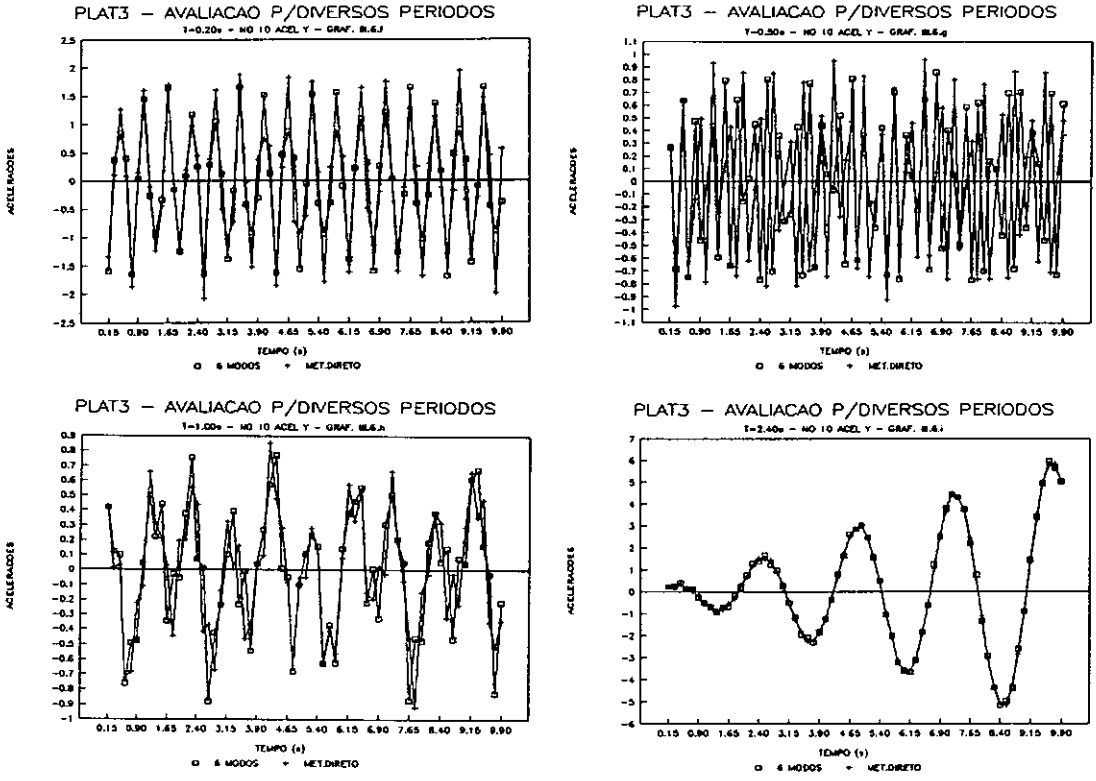
Abaixo pode ser constatado o comportamento do deslocamento na direção do carregamento para os vários períodos de excitação, bem como a aceleração no mesmo grau de liberdade. Pode-se observar que para $\bar{T}$=1.00s alcança-se um bom desempenho no deslocamento, o que não ocorre com a aceleração.











Esse fato realça a preocupação com a observação de apenas poucos graus de liberdade e/ou tipo de resposta para chegar-se a alguma conclusão quanto a qualidade da resposta.

Outra preocupação quanto a aproximação obtida pela superposição modal refere-se ao intervalo de tempo para a integração. Para medir essa influência e também a do intervalo referente ao cálculo do erro, foram verificados os valores de Erro Médio e Resíduo Máximo na região de baixos períodos para diferentes intervalos de tempo. Foram constatadas algumas diferenças mais significativas para $\bar{T}$=0.2s, indicando que os períodos inferiores de excitação mostram-se mais sensíveis a esse problema. Deve ser ressaltado que os gráficos para esses casos referem-se aos menores intervalos de tempo.

Com a maior exigência do critério de parada, para a condição "Com correção" (passando para o Critério 2b da

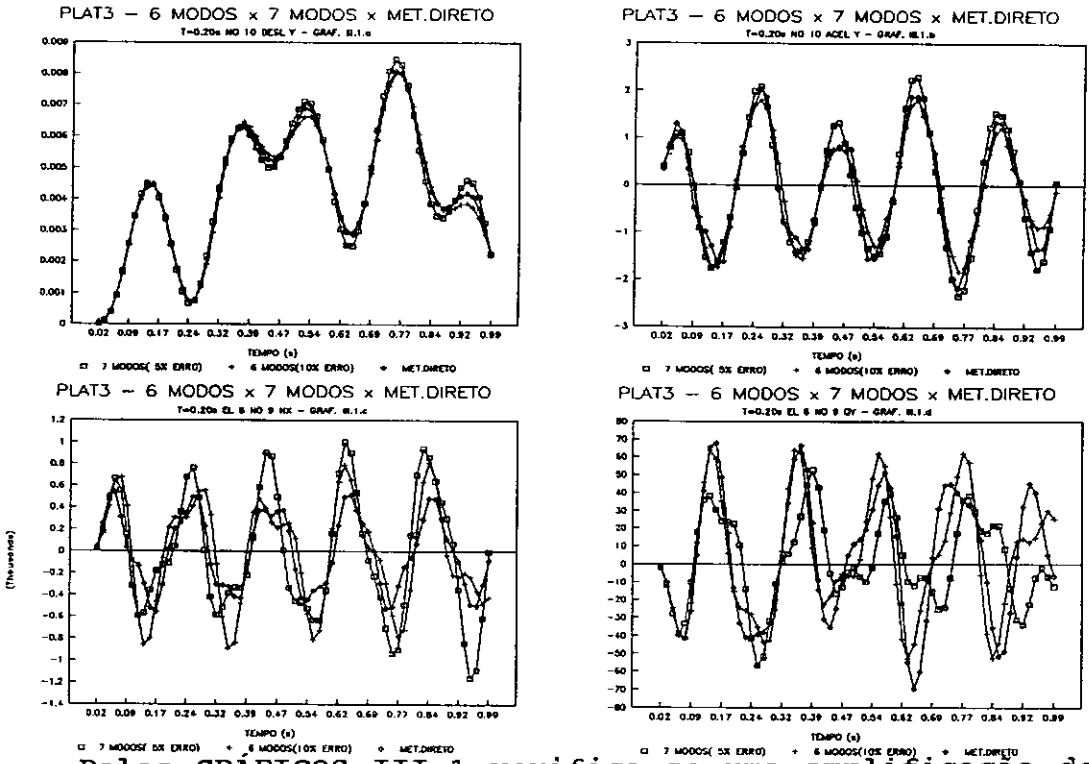
TABELA II.1), houve uma diminuição sensível do erro e um aumento do F.P.C. para 0.9600 utilizando apenas 7 modos. Essa melhora pode ser vista tanto nas TABELAS III.1, III.3, III.4, III.5 e III.6, bem como nos GRÁFICOS III.1, III.2, III.3 e III.4, ao final desse item.

As TABELAS III.3, III.4, III.5 e III.6 apresentam os valores máximos de deslocamentos e acelerações nos nós e esforços máximos nos elementos para análises de 6 modos, 7 modos(5% erro) e Newmark, de forma a permitir uma comparação direta PARÂMETROS x ESFORÇOS E DESLOCAMENTOS.

Associadas a essas tabelas, temos, respectivamente, os GRÁFICOS III.1, III.2, III.3 e III.4 com a evolução ao longo do tempo dos deslocamentos, acelerações e esforços. Vale lembrar que o nó 9 na discriminação dos esforços nas tabelas é equivalente ao nó 10 no que se refere a esforços axiais.

Cabe ressaltar, também, uma certa ordem de grandeza relacionando Resíduos Máximos e diferenças entre valores máximos de esforços no mesmo nó para a superposição modal e Newmark, indicando uma predominância da parte elástica na resposta, mesmo para os períodos mais baixos.

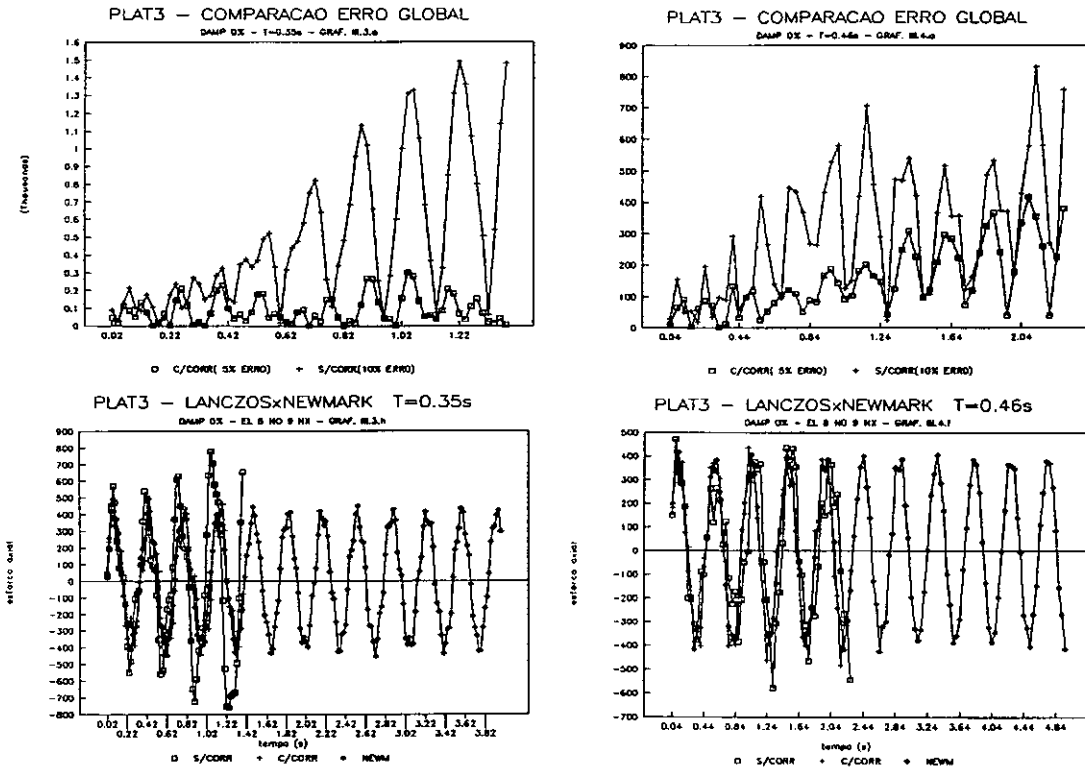
O objetivo de melhorar a resposta conforme são obtidos mais modos (ou menor índice de erro) não se concretizou para $\bar{T}$=0.20s (como se pode ver nos gráficos a seguir), onde ocorreu uma degeneração na qualidade da resposta para o caso "Com correção", portanto, contrariamente ao que se esperava (ver TABELAS III.1 e III.4). O fato que levou a esse problema é a diferença visível nos períodos encontrados nos casos "Sem correção" e "Com correção": o surgimento do período 0.2189s (6º modo) no caso "Com correção" (ver TABELA III.2).



Pelos GRÁFICOS III.1 verifica-se uma amplificação dos resultados em relação à resposta obtida pelo método de integração direta, ou seja, uma "pseudo-ressonância" em cima desse penúltimo modo. Como no caso "Sem correção", esse período de excitação está eqüidistante do último (0.1076s) e do penúltimo modo (0.3513s), esse problema não ocorre. Porém isso não significa que se tenha uma boa resposta.

É possível um delineamento da ocorrência dessa perda acentuada da qualidade observando a TABELA III.1. Com os períodos de carga coincidentes com os dois últimos modos (0.35s e 0.10s para o caso "Sem correção", e 0.20s e 0.10s para o caso "Com correção") a perda da qualidade da resposta é acentuada e apresenta tendência de degeneração.

Os gráficos abaixo correlacionam o erro global e o esforço axial no elemento 8 na apresentação da degeneração da qualidade para $\bar{T}$=0.35s e 0.46s, bem como a queda do valor do erro entre os dois.



Até $\bar{T} \geq 0.7s$ as respostas para 6 e 7 modos(5% erro) se apresentam com boa qualidade, coincidindo ou não com os períodos modais.

No caso "Sem correção" os valores de Erro Médio se elevam significativamente para $\bar{T} \leq 0.5s$, enquanto no caso de 7 modos (5% erro) os valores se mantiveram baixos até $\bar{T} > 0.2s$. Nesse caso, os GRÁFICOS III.3 e III.4 mostram as diferenças entre as respostas de 6 e 7 modos (5% erro) e a solução pelo método de integração direta, e que a perda de qualidade apontada pelos parâmetros de erro realmente ocorreu.

PLAT3 - DAMP 0% CARGA NA DIRECAO Y GLOBAL
AMPLITUDE MAXIMA DE TODAS AS CARGAS = 2120

TABELA COM RESULTADOS DOS PROC. PRELIMINARES

DESCRICAO	MODOS	PERIODO	ERRO MEDIO	DESVIO	MAX.RESID.	NO	t(s)	DIR.	dt (s)	passo
S/CORR (0)	3	T=10.0s	18.72	10.88	25.90	9	6.20	Y	0.05	3
S/CORR (1)	6	T=10.0s	3.75	2.59	-6.00	10	6.60	Y	0.05	3
S/CORR (0)	3	T=6.0s	31.30	18.21	43.40	9	6.20	Y	0.05	3
C/CORR ATUAL	4	T=6.0s	31.07	15.28	-46.30	9	1.90	Y	0.05	3
S/CORR (1)	6	T=6.0s	6.29	4.31	-9.98	10	2.40	Y	0.05	3
C/CORR (2a)	7	T=6.0s	6.63	4.32	10.50	10	6.75	Y	0.05	3
S/CORR (0)	3	T=2.4s	74.15	45.78	-109.00	9	0.90	Y	0.05	3
C/CORR ATUAL	4	T=2.4s	139.37	70.97	187.00	10	8.50	Y	0.05	3
S/CORR (1)	6	T=2.4s	21.45	11.95	-32.20	10	6.60	Y	0.05	3
C/CORR (2a)	7	T=2.4s	21.55	11.75	-32.70	10	6.90	Y	0.05	3
S/CORR (1)	6	T=1.1s	36.39	25.33	-59.40	10	2.40	Y	0.05	3
C/CORR (2b)	7	T=1.1s	18.77	12.76	-29.80	10	0.40	Y	0.05	3
S/CORR (0)	3	T=1.0s	231.10	160.52	394.00	9	6.20	Y	0.05	3
C/CORR ATUAL	4	T=1.0s	335.40	188.14	-577.00	9	1.20	Y	0.05	3
S/CORR (1)	6	T=1.0s	42.67	29.90	-71.30	10	2.40	Y	0.05	3
C/CORR (2a)	7	T=1.0s	44.63	29.99	71.70	10	2.55	Y	0.05	3
S/CORR (1)	6	T=0.7s	63.51	55.92	-134.00	10	3.80	Y	0.05	3
C/CORR (2b)	7	T=0.7s	26.75	18.22	47.50	10	4.90	Y	0.05	3
S/CORR (0)	3	T=0.5s	727.14	535.33	-1250.00	9	4.10	Y	0.05	3
C/CORR ATUAL	4	T=0.5s	446.50	187.50					0.05	3
S/CORR (1)	6	T=0.5s	261.78	161.40	-431.00	10	2.40	Y	0.05	3
C/CORR (2a)	7	T=0.5s	207.64	149.62	-376.00	10	2.40	Y	0.05	3
S/CORR (1)	6	T=0.5s	265.49	178.43	-465.00	10	2.40	Y	0.01	5
S/CORR (1)	6	T=0.46s	307.38	202.83	619.00	10	2.12	Y	0.05	3
C/CORR (2b)	7	T=0.46s	151.35	106.81	354.00	9	2.08	Y	0.05	3
S/CORR (1)	6	T=0.35s	489.46	411.06	-897.00	10	1.22	Y	0.05	3
C/CORR (2b)	7	T=0.35s	88.29	76.32	-198.00	10	1.04	Y	0.05	3
S/CORR (1)	6	T=0.2s	203.10	120.02	276.00	10	5.25	Y	0.05	3
C/CORR (2a)	7	T=0.2s	201.52	118.84	268.00	10	1.05	Y	0.05	3
S/CORR (1)	6	T=0.2s	241.75	177.58	-361.00	10	0.78	Y	0.005	3
C/CORR (2b)	7	T=0.2s	417.78	309.31	-784.00	10	0.95	Y	0.05	3
S/CORR (0)	6	T=0.1s	2635.74	1731.11	3400.00	10	0.68	Y	0.05	3
C/CORR (2b)	7	T=0.1s	1754.49	1141.86	-2520.00	10	0.68	Y	0.05	3

CRITERIO DE PARADA:

S/CORR (0) - CRITERIO 0
S/CORR (1) - CRITERIO 1
C/CORR ATUAL.- VETOR ESTATICO
C/CORR (2a) - CRITERIO 2a
C/CORR (2b) - CRITERIO 2b
ALG.08 - CRITERIO 4

TABELA III.1

PROCEDIMENTOS PRELIMINARES - PLAT3

PERÍODOS (s)

	3 MODOS	6 MODOS	7 MODOS(i)	7 MODOS(j)
1	2.4080	2.4080	2.4080	2.4080
2	0.7104	1.3530	1.3600	1.3740
3	0.3220	0.7120	1.3020	1.1000
4		0.4630	0.7120	0.7120
5		0.3513	0.4539	0.3525
6		0.1076	0.3513	0.2189
7			0.1075	0.0930
F.P.C.	0.6747	0.9036	0.9041	0.9600
MASSA X	0.0018	0.0072	-	0.0109
MASSA Y	0.5035	0.5377	-	0.5794
MASSA Z	0.0001	0.0022	-	0.0056
M.total	0.2041	0.2089	0.2250	0.2245

(i) - com atualização do vetor estático
(j) - 5% erro

TABELA III.2

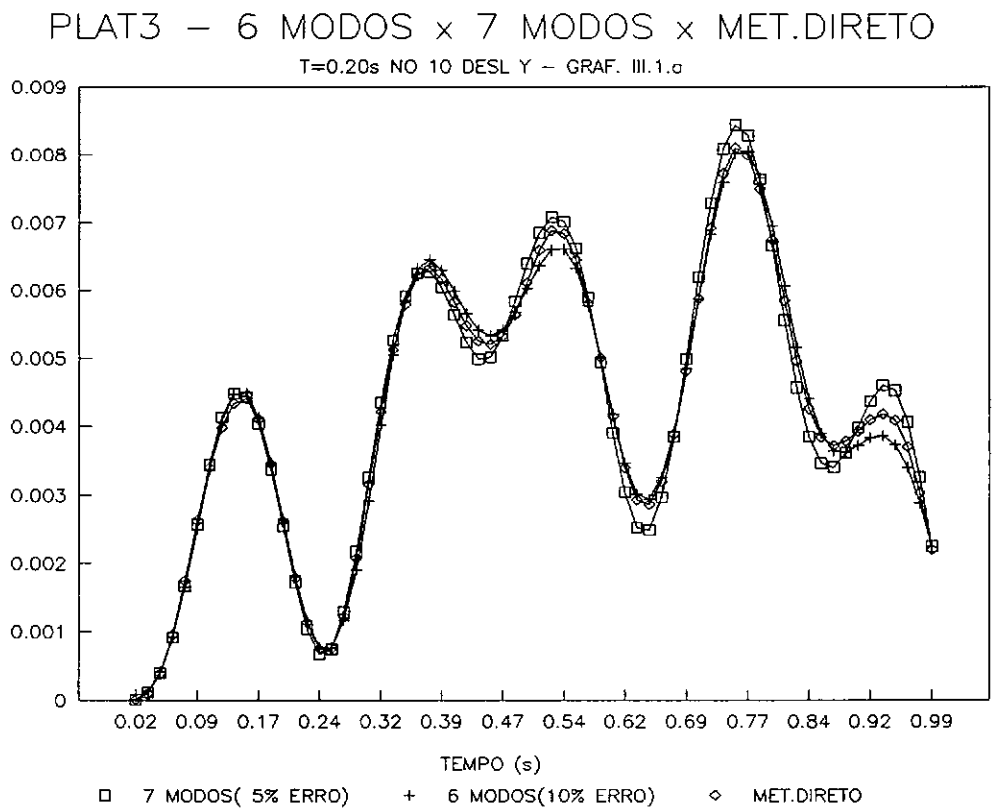
PROCEDIMENTOS PRELIMINARES - PLAT3

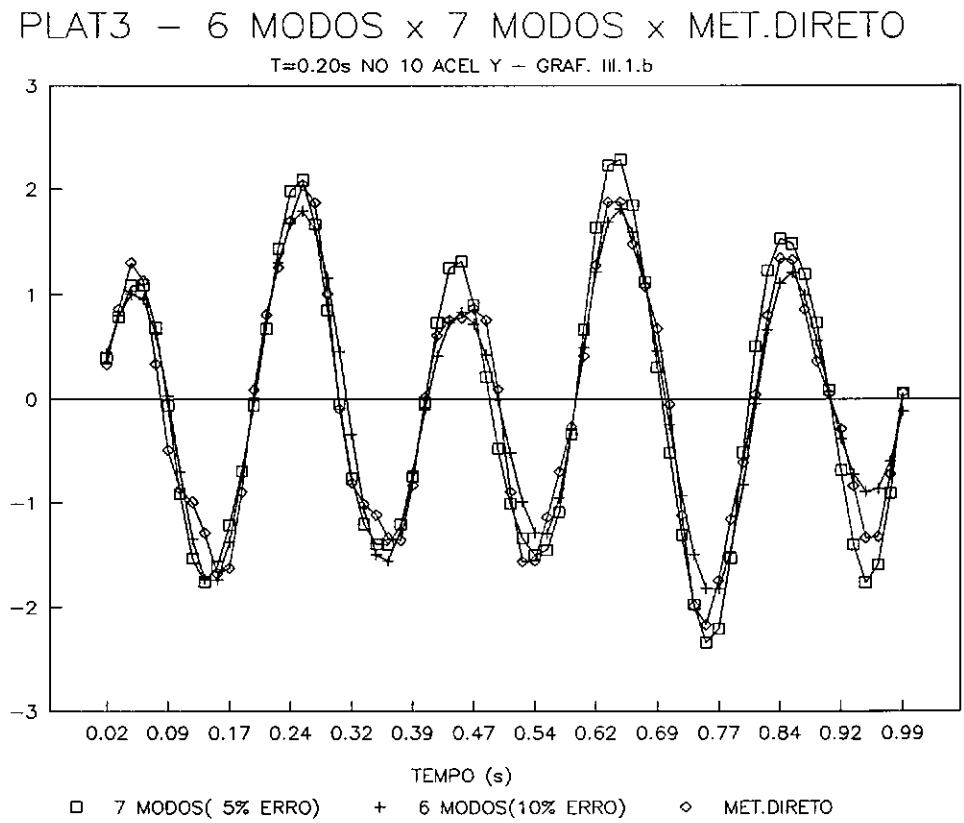
VALORES MÁXIMOS EM MÓDULO - $\bar{T}$=0.2s

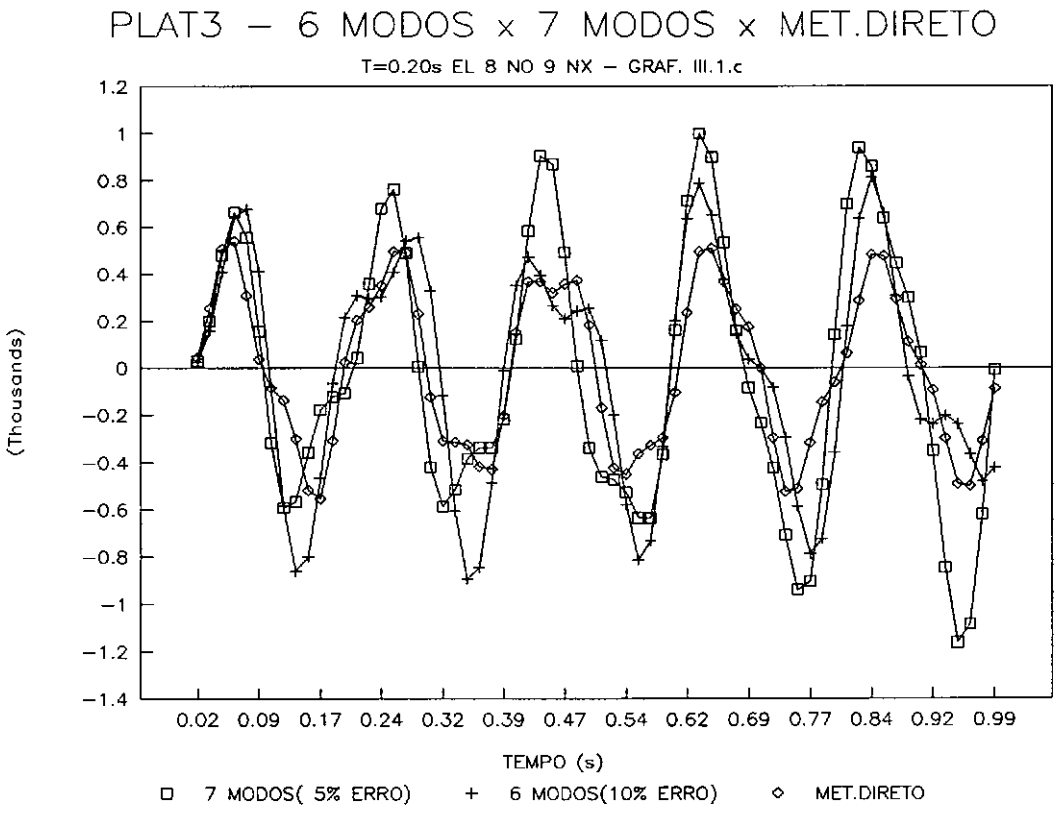
6 MODOS ("S/CORR.") ERRO 10%
x
7 MODOS ("C/CORR.") ERRO 5%
x
MÉTODO DE INTEGRAÇÃO DIRETA

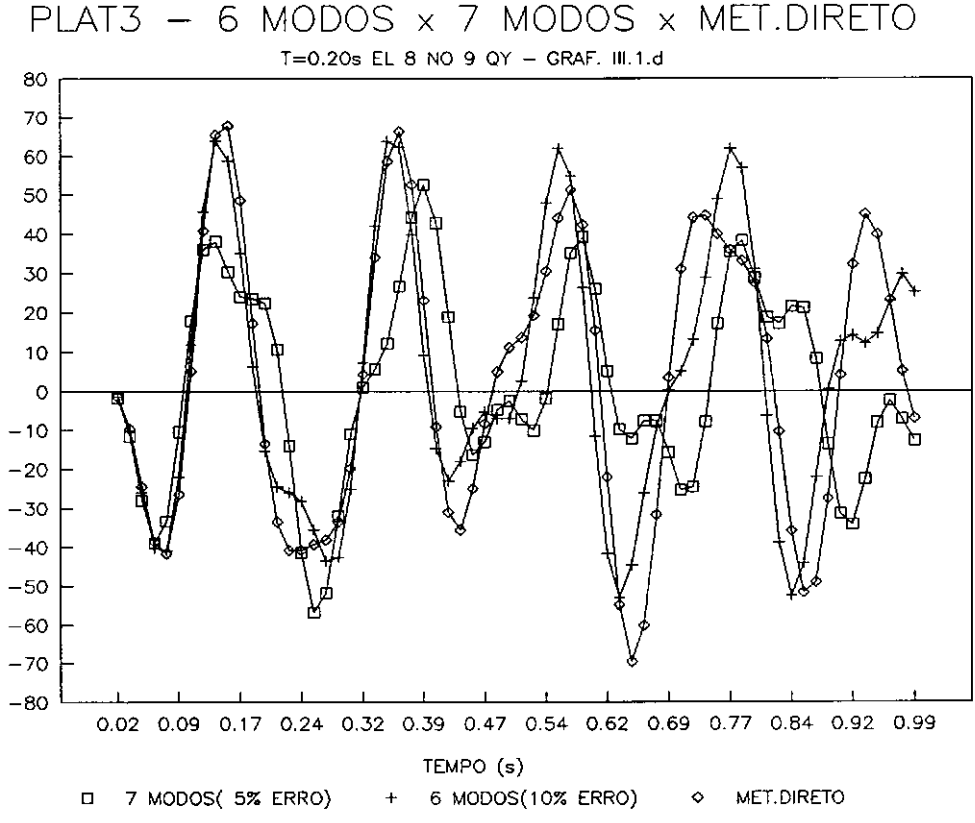
		COM	CORR	SEM	CORR	MET.	DIRETO
	NO	DESL Y	ACEL Y	DESL Y	ACEL Y	DESL Y	ACEL Y
	1	.829E-2 0.62s	.709E+0 0.63s	.802E-2 0.62s	.475E+0 0.65s	–	–
	9	.793E-2 0.75s	.188E+1 0.74s	.770E-2 0.75s	.193E+1 0.24s	–	–
	10	.844E-2 0.75s	.234E+1 0.75s	.804E-2 0.77s	.182E+1 0.77s	.809E-2 0.75s	.217E+1 0.75s
	14	.425E-2 0.92s	.630E+0 0.17s	.433E-2 0.93s	.808E+0 0.96s	–	–
	15	.441E-2 0.95s	.862E+0 0.95s	.442E-2 0.93s	.701E+0 0.35s	.447E-2	.818E+0
	21	.138E-2 0.95s	.867E+0 0.95s	.572E-3 0.26s	.147E+0 0.63s	–	–
EL	NO	NX	QY	NX	QY	NX	QY
1	1	110.7 0.95s	68.4 0.63s	14.2 0.57s	41.0 0.63s	–	–
6	6	100.3 0.39s	224.0 0.26s	107.2 0.14s	240.7 0.14s	–	–
7	7	114.9 0.95s	0.1 0.29s	69.9 0.14s	0.1 0.77s	–	–
8	9	1163.0 0.95s	56.9 0.26s	896.3 0.35s	63.9 0.14s	554.4 0.17s	69.6 0.65s
21	4	420.6 0.95s	452.9 0.63s	215.8 0.63s	332.8 0.65s	388.1	425.1
23	9	827.0 0.95s	171.8 0.77s	435.6 0.63s	170.4 0.77s	–	–
		ERRO MÉDIO 417.8		ERRO MÉDIO 241.7			
		DESVIO 309.3		DESVIO 177.6			
		RESID (MAX) -784.0 0.95s		RESID (MAX) -361.0 0.78s		=>NÓ 10 DIR.Y	

TABELA III.3


PLAT3 – 6 MODOS x 7 MODOS x MET.DIRETO
T=0.20s NO 10 DESL Y – GRAF. III.1.a
0.009
0.008
0.007
0.006
0.005
0.004
0.003
0.002
0.001
0
0.02 0.09 0.17 0.24 0.32 0.39 0.47 0.54 0.62 0.69 0.77 0.84 0.92 0.99
TEMPO (s)
7 MODOS(5% ERRO)
6 MODOS(10% ERRO)
MET.DIRETO


PLAT3 – 6 MODOS x 7 MODOS x MET.DIRETO
T=0.20s NO 10 ACEL Y – GRAF. III.1.b
3
2
1
0
−1
−2
−3
0.02 0.09 0.17 0.24 0.32 0.39 0.47 0.54 0.62 0.69 0.77 0.84 0.92 0.99
TEMPO (s)
7 MODOS(5% ERRO)
6 MODOS(10% ERRO)
MET.DIRETO


PLAT3 – 6 MODOS x 7 MODOS x MET.DIRETO
T=0.20s EL 8 NO 9 NX – GRAF. III.1.c
(Thousands)
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
−0.2
−0.4
−0.6
−0.8
−1
−1.2
−1.4
0.02 0.09 0.17 0.24 0.32 0.39 0.47 0.54 0.62 0.69 0.77 0.84 0.92 0.99
TEMPO (s)
7 MODOS(5% ERRO)
6 MODOS(10% ERRO)
MET.DIRETO


PLAT3 – 6 MODOS x 7 MODOS x MET.DIRETO
T=0.20s EL 8 NO 9 QY – GRAF. III.1.d
80
70
60
50
40
30
20
10
0
−10
−20
−30
−40
−50
−60
−70
−80
0.02 0.09 0.17 0.24 0.32 0.39 0.47 0.54 0.62 0.69 0.77 0.84 0.92 0.99
TEMPO (s)
7 MODOS(5% ERRO)
6 MODOS(10% ERRO)
MET.DIRETO

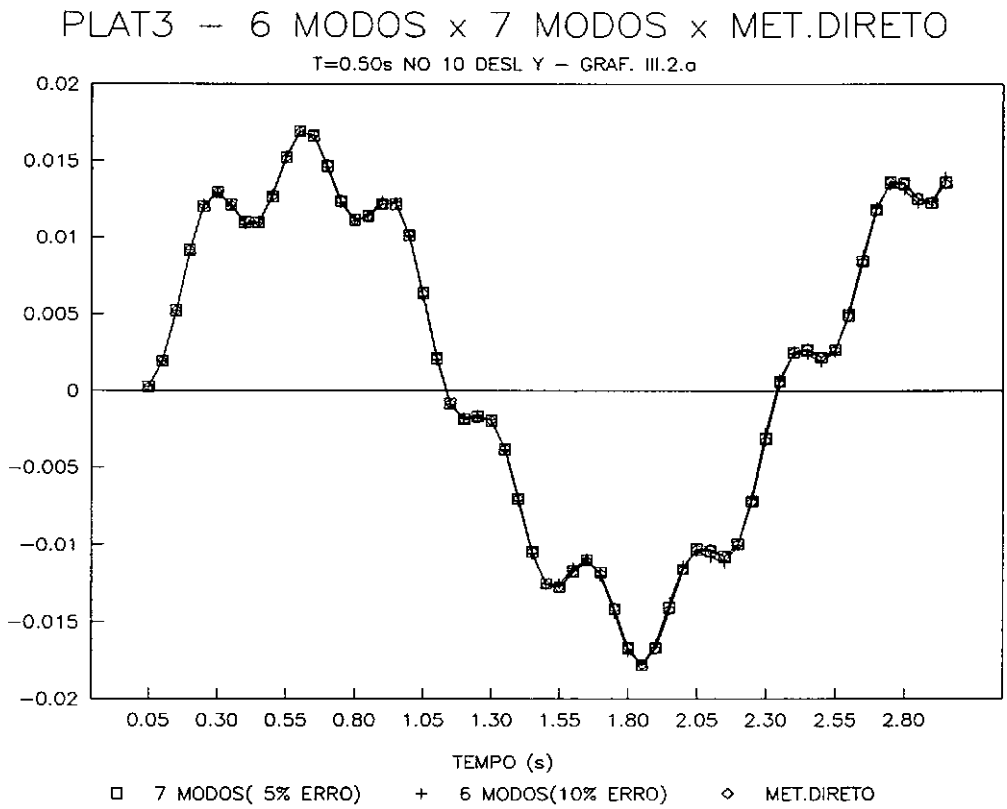
PROCEDIMENTOS PRELIMINARES - PLAT3

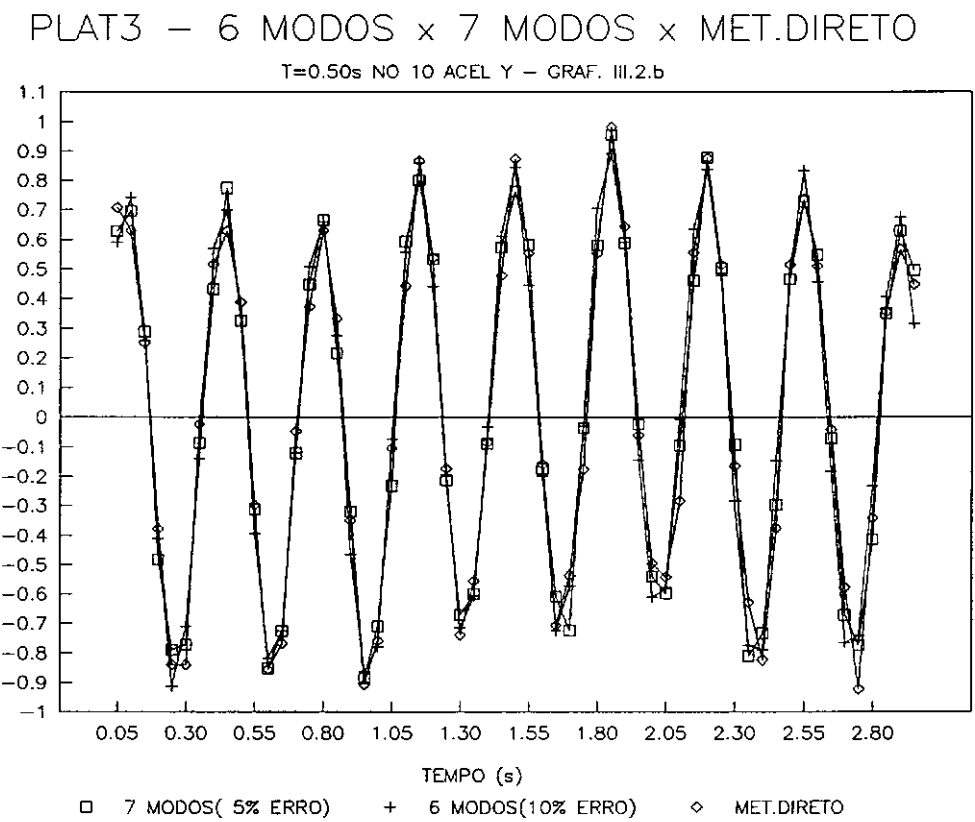
VALORES MÁXIMOS EM MÓDULO - $\bar{T}$=0.50s

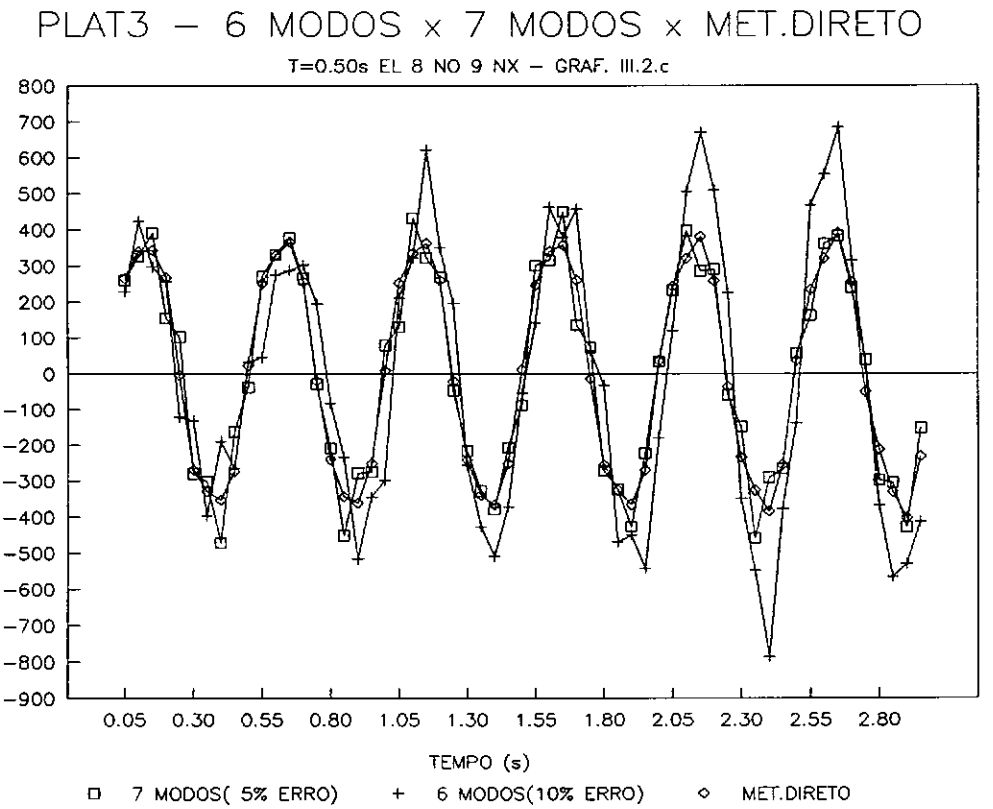
6 MODOS ("S/CORR.") ERRO 10%
x
7 MODOS ("C/CORR.") ERRO 5%
x
MÉTODO DE INTEGRAÇÃO DIRETA

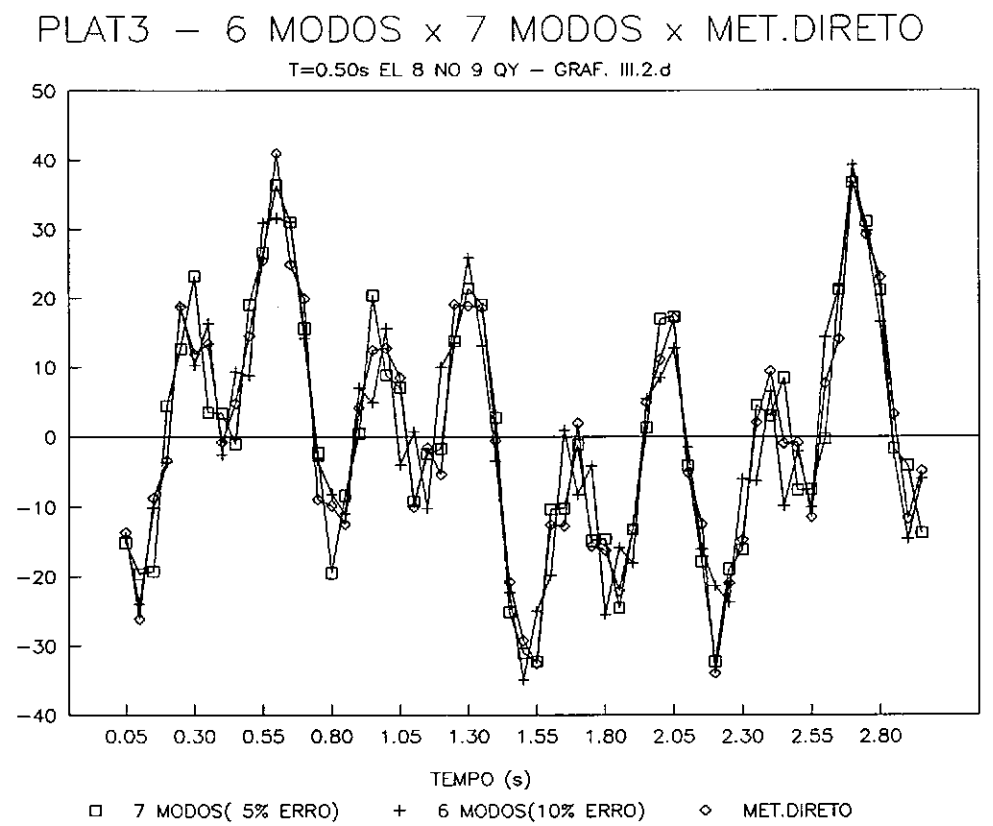
		COM CORR		SEM CORR		MET. DIRETO	
	NO	DESL Y	ACEL Y	DESL Y	ACEL Y	DESL Y	ACEL Y
	1	.228E-1 1.65s	.118E+1 1.65s	.228E-1 1.65s	.118E+1 1.65s	_	_
	9	.180E-1 1.85s	.983E+0 0.25s	.180E-1 1.85s	.108E+1 1.85s	_	_
	10	.178E-1 1.85s	.956E+0 1.85s	.178E-1 1.85s	.913E+0 0.25s	.178E-1 1.85s	.982E+0 1.85s
	14	.214E-1 0.85s	.186E+1 0.60s	.213E-1 0.85s	.192E+1 0.85s	_	_
	15	.215E-1 0.85s	.194E+1 0.85s	.215E-1 0.85s	.187E+1 0.60s	_	_
	21	.276E-2 0.85s	.365E+0 0.85s	.282E-2 2.90s	.379E+0 2.90s	_	_
EL	NO	NX	QY	NX	QY	NX	QY
1	1	21.6 1.65s	81.0 1.65s	34.2 2.40s	80.5 1.65s	_	_
6	6	54.5 0.95s	90.4 1.85s	41.6 0.10s	119.9 2.40s	_	_
7	7	29.5 2.35s	0.1 0.60s	61.5 2.40s	0.1 0.60s	_	_
8	9	471.4 0.40s	36.6 2.70s	784.9 2.40s	39.2 2.70s	402.7 2.90s	40.9 0.60s
21	4	591.9 1.65s	903.8 1.65s	633.4 1.65s	904.2 1.65s	_	_
23	9	902.4 1.65s	843.1 0.60s	999.0 1.65s	840.6 0.60s	_	_
		ERRO MÉDIO 44.4		ERRO MÉDIO 265.5			
		DESVIO 29.8		DESVIO 178.4			
		RESID (MAX) -75.8 0.40s		RESID (MAX) -465.2 2.40s		=>NÓ 10 DIR.Y	

TABELA III.4


PLAT3 – 6 MODOS x 7 MODOS x MET.DIRETO
T=0.50s NO 10 DESL Y – GRAF. III.2.a
0.02
0.015
0.01
0.005
0
−0.005
−0.01
−0.015
−0.02
0.05 0.30 0.55 0.80 1.05 1.30 1.55 1.80 2.05 2.30 2.55 2.80
TEMPO (s)
7 MODOS(5% ERRO)
6 MODOS(10% ERRO)
MET.DIRETO


PLAT3 – 6 MODOS x 7 MODOS x MET.DIRETO
T=0.50s NO 10 ACEL Y – GRAF. III.2.b
1.1
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
−0.1
−0.2
−0.3
−0.4
−0.5
−0.6
−0.7
−0.8
−0.9
−1
0.05 0.30 0.55 0.80 1.05 1.30 1.55 1.80 2.05 2.30 2.55 2.80
TEMPO (s)
7 MODOS(5% ERRO)
6 MODOS(10% ERRO)
MET.DIRETO


PLAT3 – 6 MODOS x 7 MODOS x MET.DIRETO
T=0.50s EL 8 NO 9 NX – GRAF. III.2.c
800
700
600
500
400
300
200
100
0
−100
−200
−300
−400
−500
−600
−700
−800
−900
0.05 0.30 0.55 0.80 1.05 1.30 1.55 1.80 2.05 2.30 2.55 2.80
TEMPO (s)
7 MODOS(5% ERRO)
6 MODOS(10% ERRO)
MET.DIRETO


PLAT3 – 6 MODOS x 7 MODOS x MET.DIRETO
T=0.50s EL 8 NO 9 QY – GRAF. III.2.d
50
40
30
20
10
0
−10
−20
−30
−40
0.05 0.30 0.55 0.80 1.05 1.30 1.55 1.80 2.05 2.30 2.55 2.80
TEMPO (s)
7 MODOS(5% ERRO)
6 MODOS(10% ERRO)
MET.DIRETO

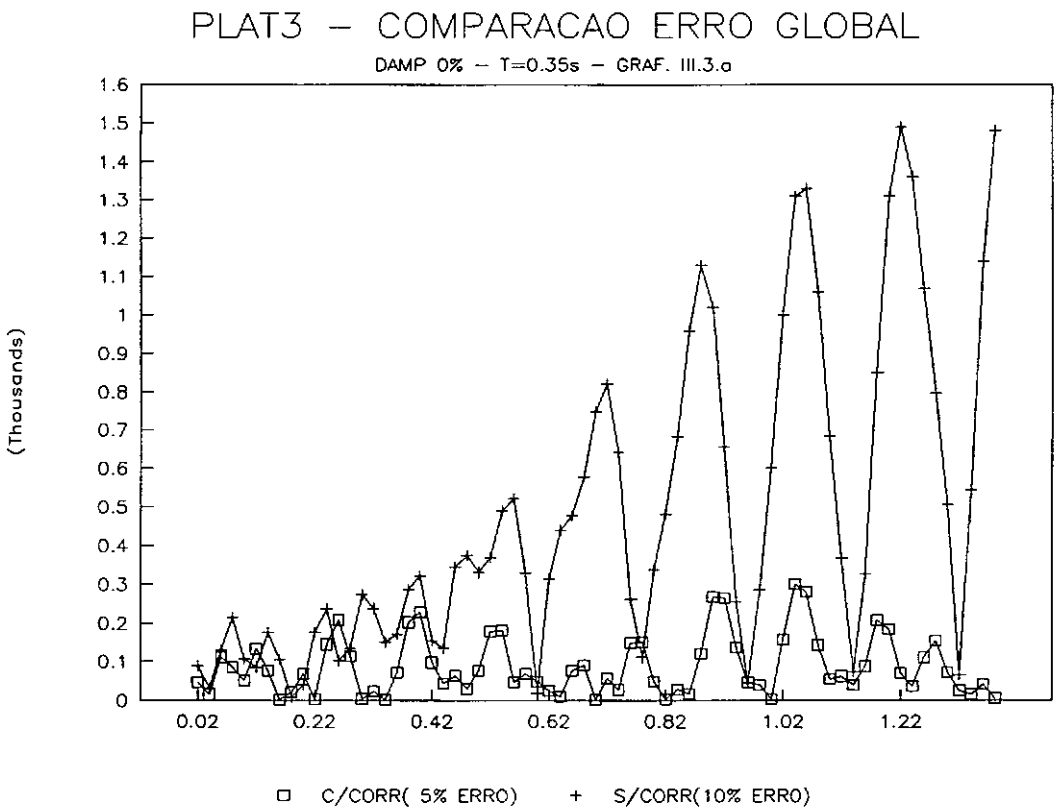
PROCEDIMENTOS PRELIMINARES - PLAT3

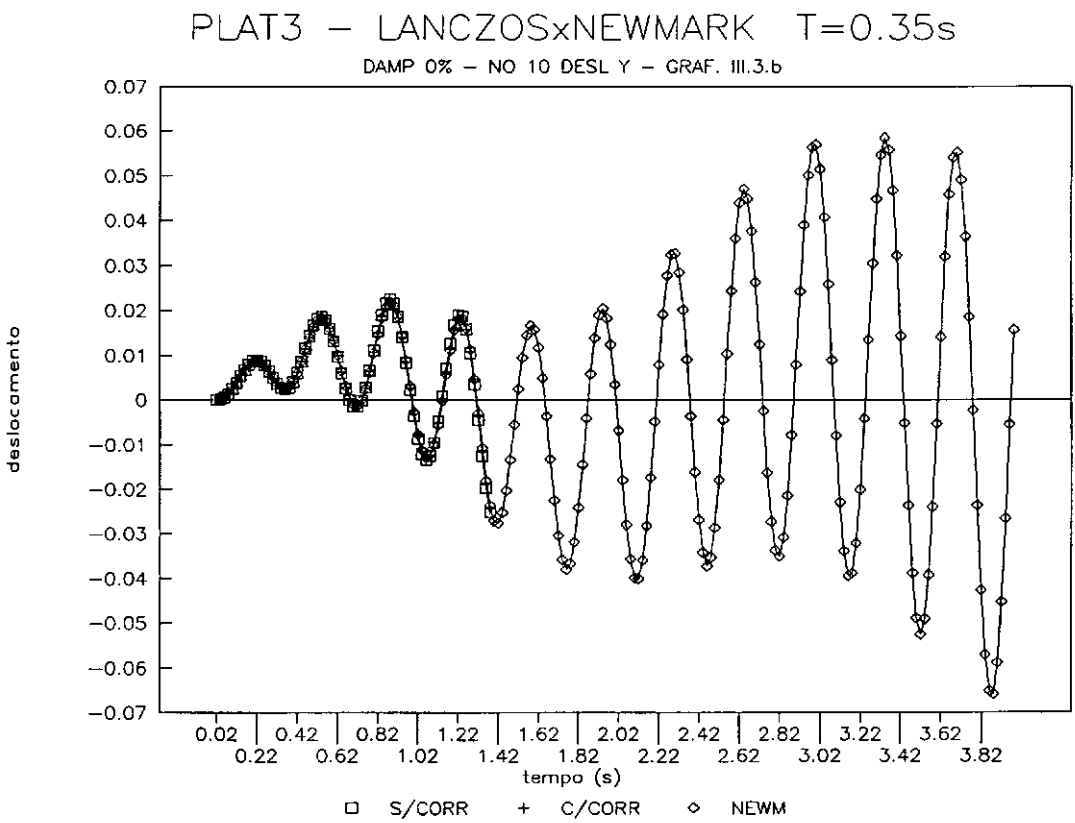
VALORES MÁXIMOS EM MÓDULO - $\bar{T}$=0.35s

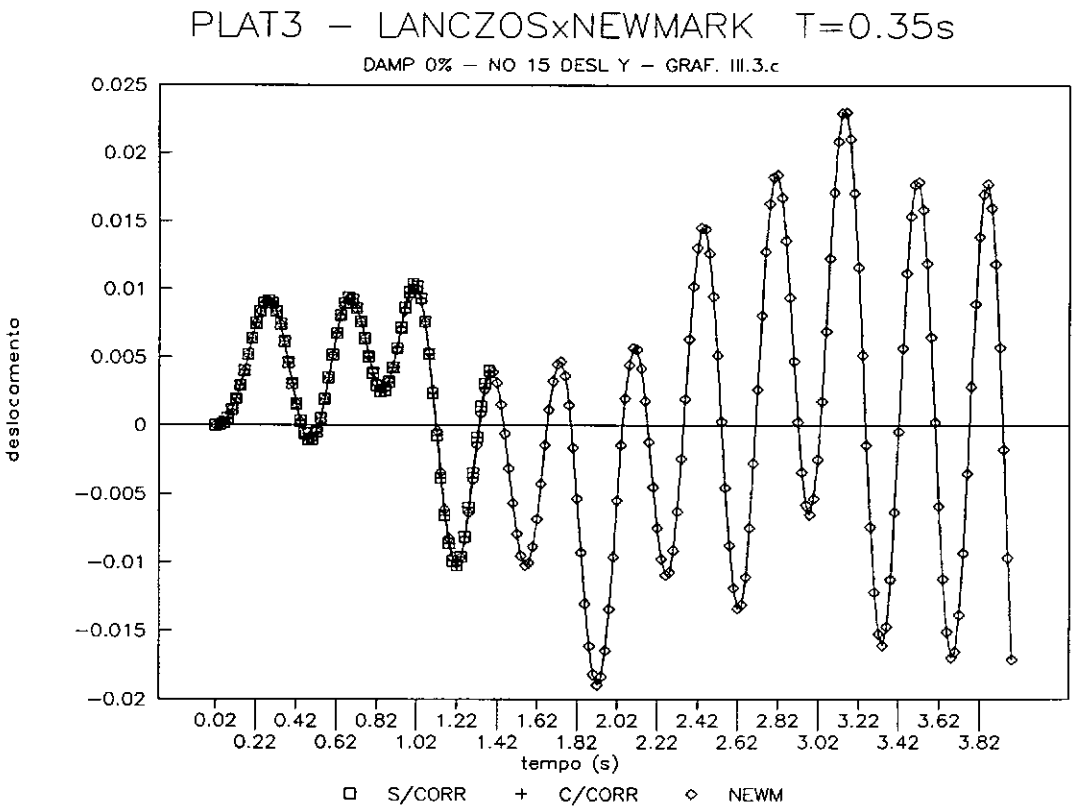
6 MODOS ("SEM CORR.") ERRO 10%
x
7 MODOS ("COM CORR.") ERRO 5%
x
MÉTODO DE INTEGRAÇÃO DIRETA

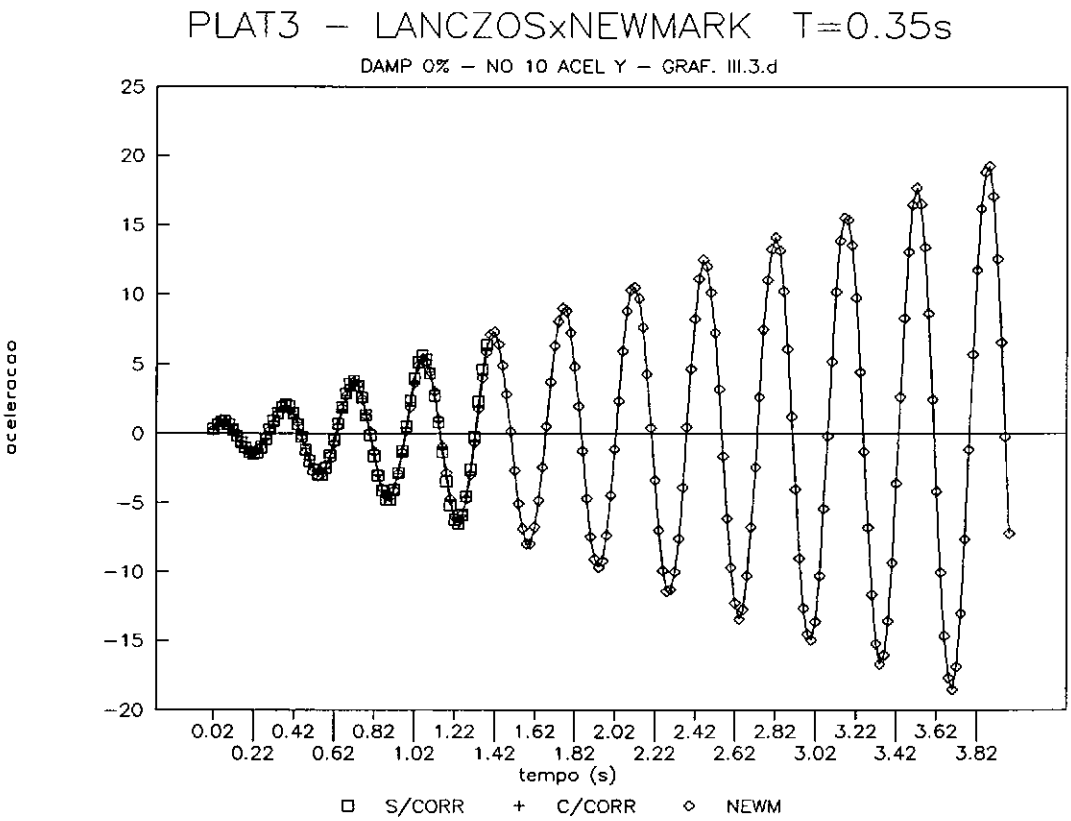
		SEM	CORR	COM	CORR	MET.	DIRETO
	NO	DESL Y	ACEL Y	DESL Y	ACEL Y	DESL Y	ACEL Y
	1	.178E-1	.364E+1	.177E-1	.351E+1	-	-
	9	.247E-1	.639E+1	.243E-1	.617E+1	-	-
	10	.251E-1	.649E+1	.242E-1	.644E+1	.219E-1	.637E+1
	14	.104E-1	.257E+1	.103E-1	.250E+1	-	-
	15	.104E-1	.236E+1	.103E-1	.240E+1	.101E-1	.229E+1
	21	.301E-2	.894E+0	.370E-2	.103E+1	-	-
EL	NO	NX	QY	NX	QY	NX	QY
1	1	.112E+3	.279E+3	.345E+2	.244E+3	-	-
6	6	.149E+3	.646E+3	.228E+3	.567E+3	-	-
7	7	.147E+3	.225E+3	.783E+2	.247E+0	-	-
8	9	.778E+3	.127E+3	.494E+3	.147E+3	.429E+3	.133E+3
21	4	.137E+4	.271E+4	.163E+4	.257E+4	.158E+4	.251E+4
23	9	.155E+4	.152E+4	.209E+4	.150E+4	-	-
		ERRO MÉDIO 489.5		ERRO MÉDIO 88.3			
		DESVIO 411.1		DESVIO 76.3			
		RESID (MAX) -897.0 1.22s		RESID (MAX) -198.0 1.04s		=>NÓ 10 DIR.Y	

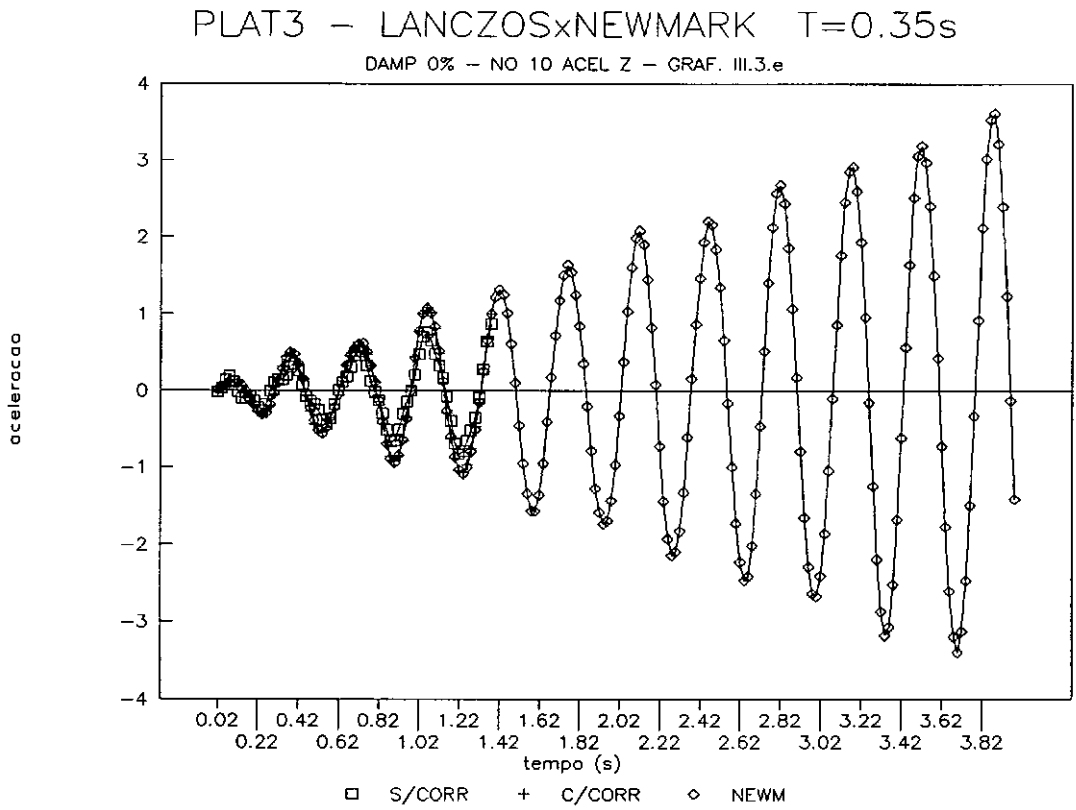
TABELA III.5

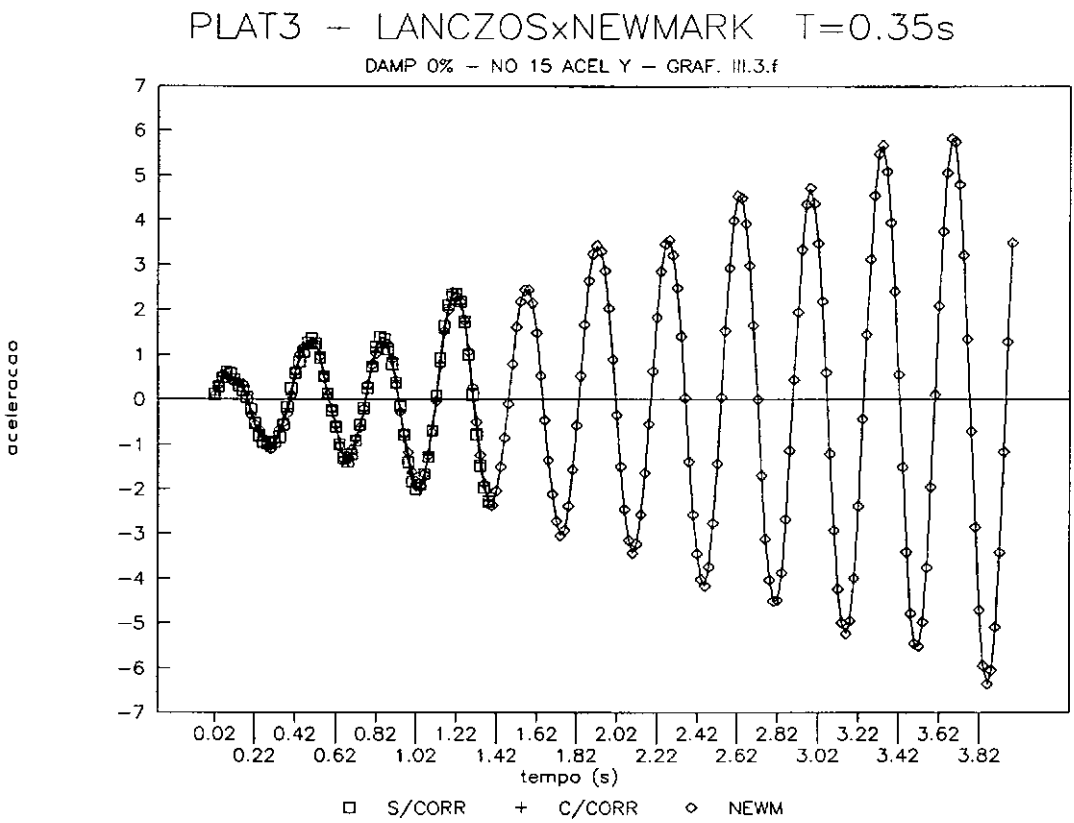

PLAT3 – COMPARACAO ERRO GLOBAL
DAMP 0% – T=0.35s – GRAF. III.3.a
(Thousands)
1.6
1.5
1.4
1.3
1.2
1.1
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0.02
0.22
0.42
0.62
0.82
1.02
1.22
C/CORR(5% ERRO)
S/CORR(10% ERRO)

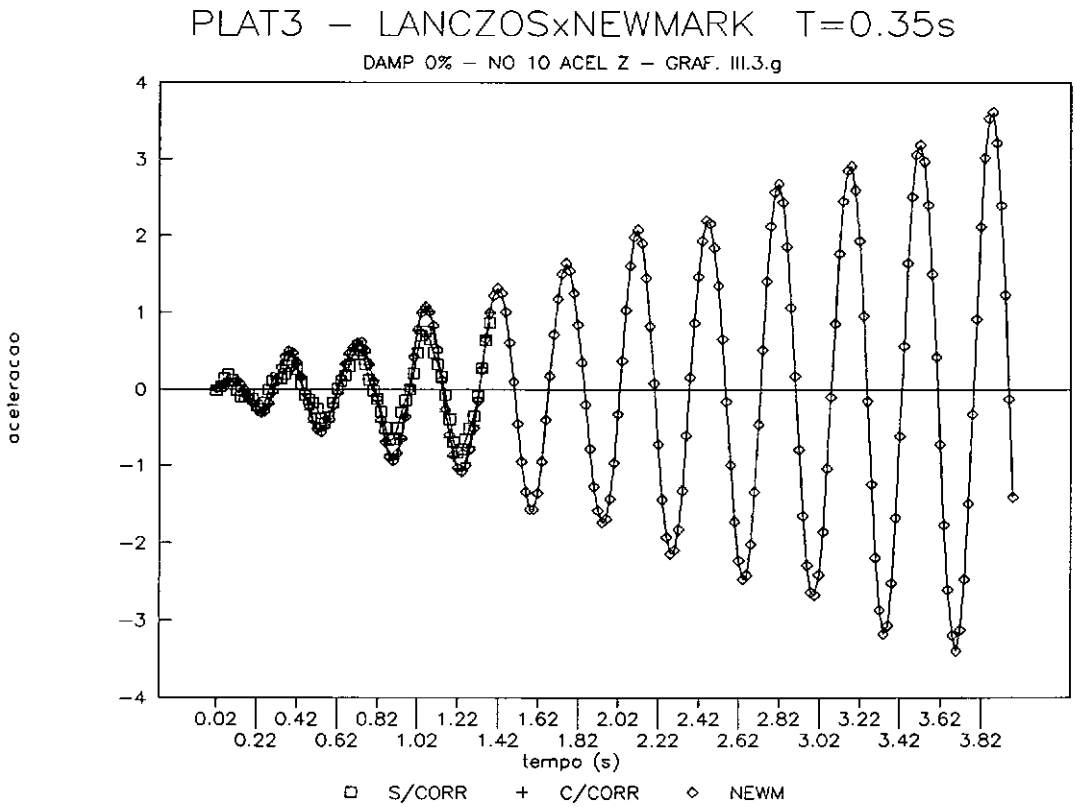

PLAT3 – LANCZOSxNEWMARK T=0.35s
DAMP 0% – NO 10 DESL Y – GRAF. III.3.b
deslocamento
0.07
0.06
0.05
0.04
0.03
0.02
0.01
0
−0.01
−0.02
−0.03
−0.04
−0.05
−0.06
−0.07
0.02
0.22
0.42
0.62
0.82
1.02
1.22
1.42
1.62
1.82
2.02
2.22
2.42
2.62
2.82
3.02
3.22
3.42
3.62
3.82
tempo (s)
S/CORR
C/CORR
NEWM

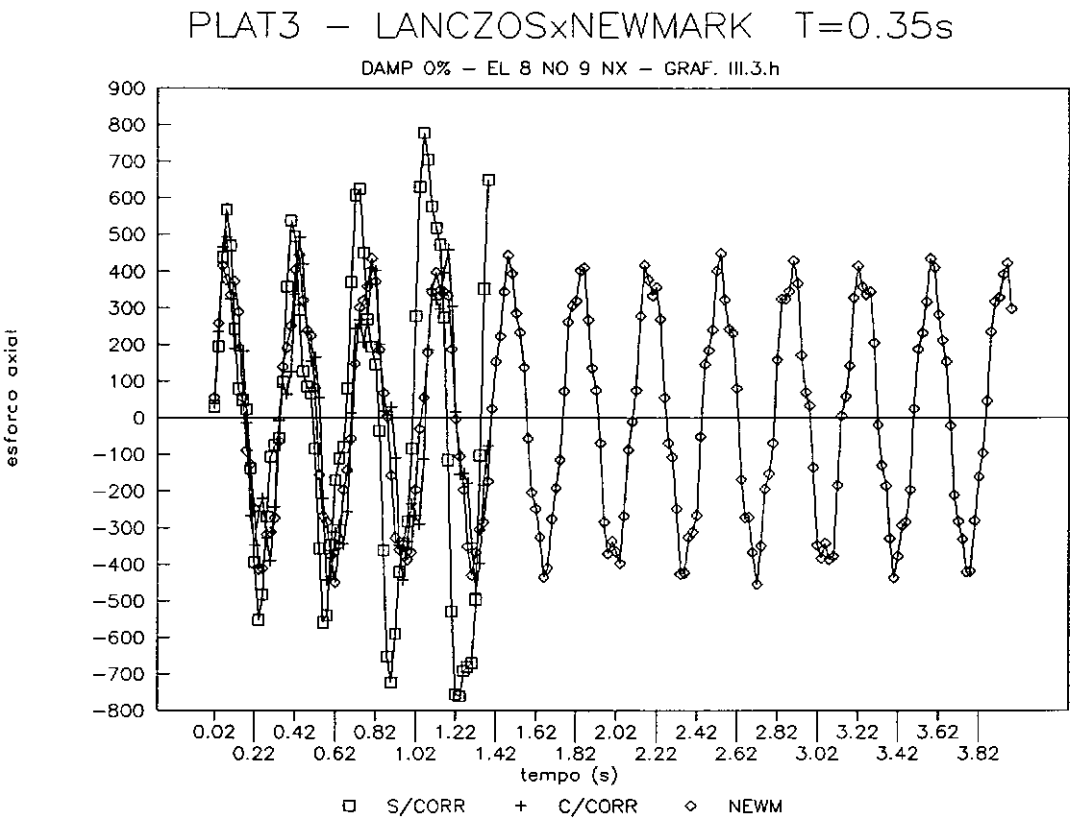

PLAT3 – LANCZOSxNEWMARK T=0.35s
DAMP 0% – NO 15 DESL Y – GRAF. III.3.c
deslocamento
0.025
0.02
0.015
0.01
0.005
0
−0.005
−0.01
−0.015
−0.02
0.02 0.22 0.42 0.62 0.82 1.02 1.22 1.42 1.62 1.82 2.02 2.22 2.42 2.62 2.82 3.02 3.22 3.42 3.62 3.82
tempo (s)
S/CORR
C/CORR
NEWM

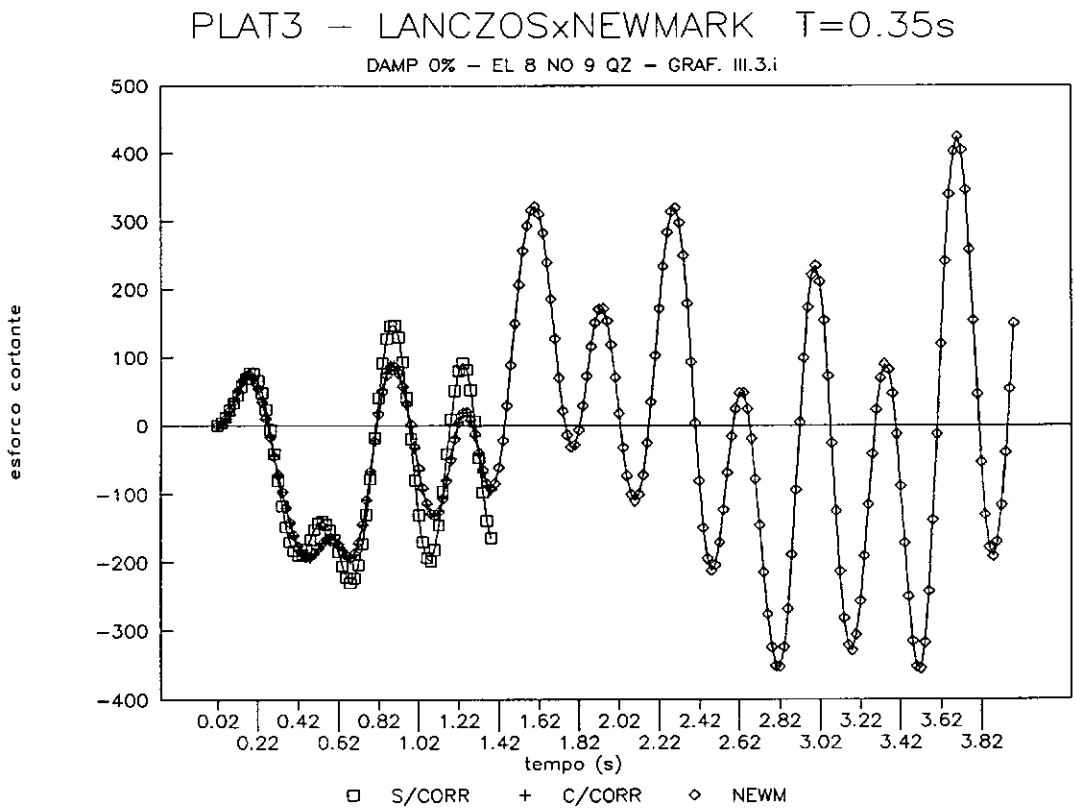

PLAT3 – LANCZOSxNEWMARK T=0.35s
DAMP 0% – NO 10 ACEL Y – GRAF. III.3.d
aceleracao
25
20
15
10
5
0
−5
−10
−15
−20
0.02 0.22 0.42 0.62 0.82 1.02 1.22 1.42 1.62 1.82 2.02 2.22 2.42 2.62 2.82 3.02 3.22 3.42 3.62 3.82
tempo (s)
S/CORR
C/CORR
NEWM

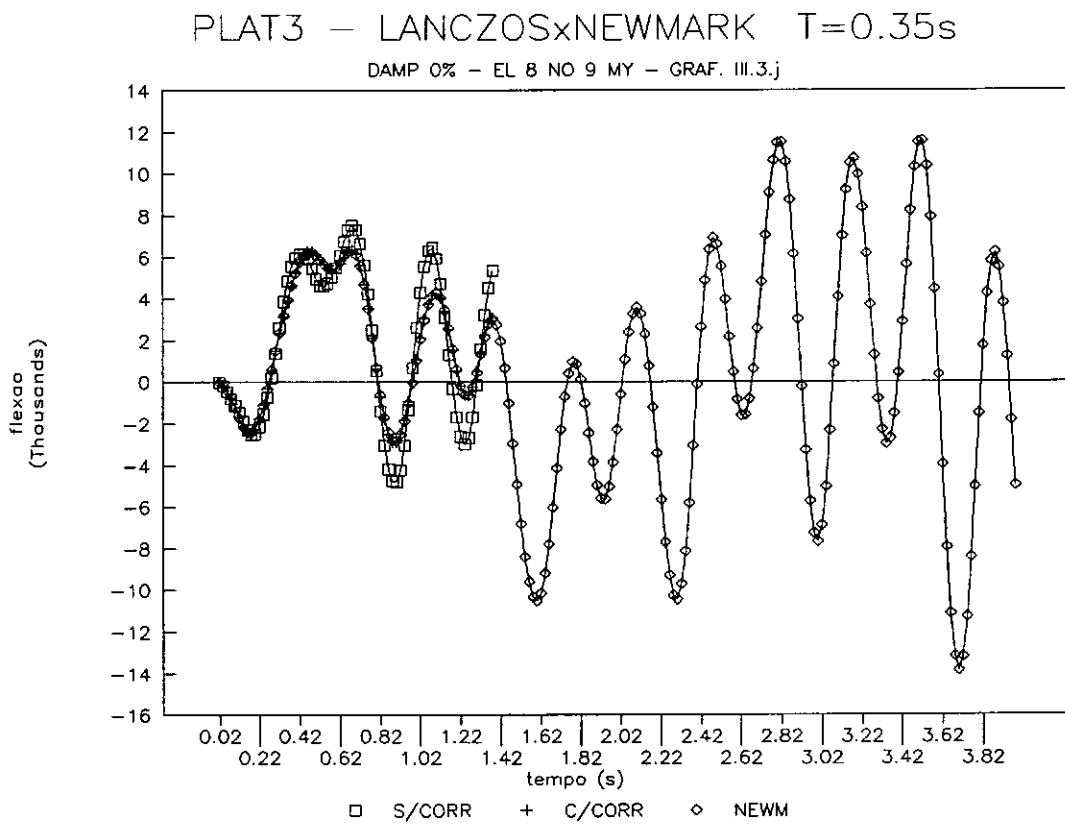

PLAT3 – LANCZOSxNEWMARK T=0.35s
DAMP 0% – NO 10 ACEL Z – GRAF. III.3.e
aceleracao
4
3
2
1
0
−1
−2
−3
−4
0.02 0.22 0.42 0.62 0.82 1.02 1.22 1.42 1.62 1.82 2.02 2.22 2.42 2.62 2.82 3.02 3.22 3.42 3.62 3.82
tempo (s)
S/CORR
C/CORR
NEWM

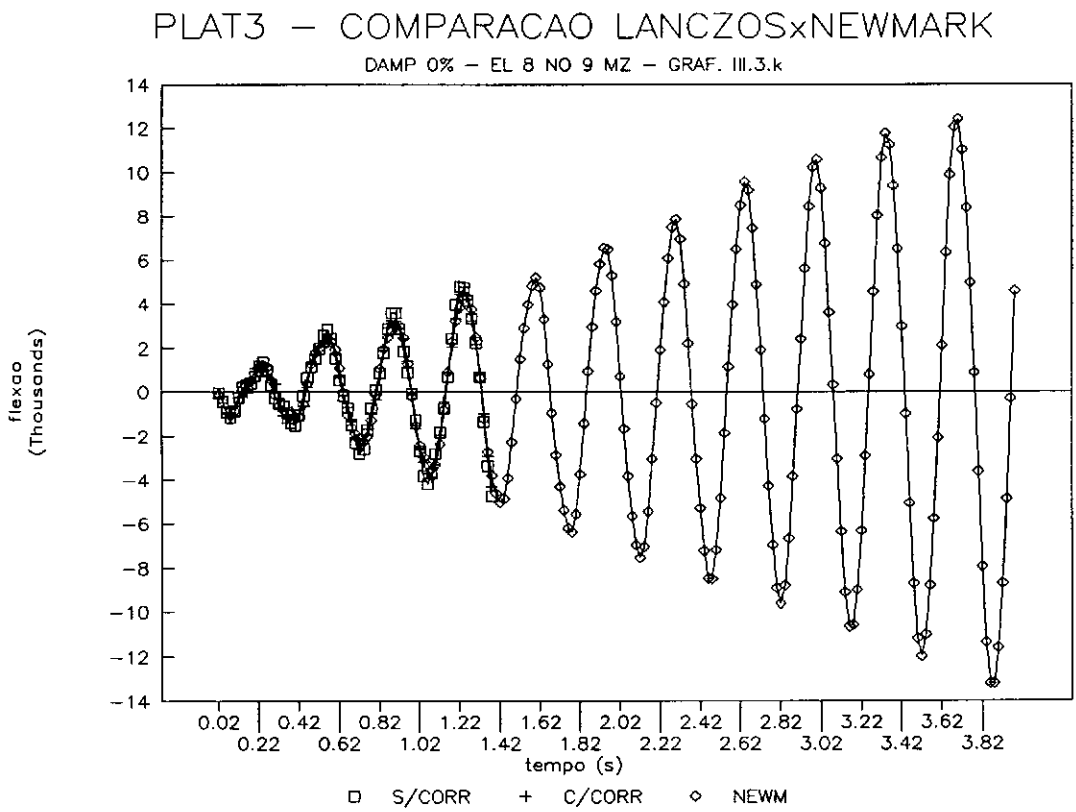

PLAT3 – LANCZOSxNEWMARK T=0.35s
DAMP 0% – NO 15 ACEL Y – GRAF. III.3.f
aceleracao
7
6
5
4
3
2
1
0
−1
−2
−3
−4
−5
−6
−7
0.02 0.22 0.42 0.62 0.82 1.02 1.22 1.42 1.62 1.82 2.02 2.22 2.42 2.62 2.82 3.02 3.22 3.42 3.62 3.82
tempo (s)
S/CORR
C/CORR
NEWM


PLAT3 – LANCZOSxNEWMARK T=0.35s
DAMP 0% – NO 10 ACEL Z – GRAF. III.3.g
aceleracao
4
3
2
1
0
−1
−2
−3
−4
0.02 0.22 0.42 0.62 0.82 1.02 1.22 1.42 1.62 1.82 2.02 2.22 2.42 2.62 2.82 3.02 3.22 3.42 3.62 3.82
tempo (s)
S/CORR
C/CORR
NEWM


PLAT3 – LANCZOSxNEWMARK T=0.35s
DAMP 0% – EL 8 NO 9 NX – GRAF. III.3.h
esforco axial
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
−100
−200
−300
−400
−500
−600
−700
−800
0.02 0.22 0.42 0.62 0.82 1.02 1.22 1.42 1.62 1.82 2.02 2.22 2.42 2.62 2.82 3.02 3.22 3.42 3.62 3.82
tempo (s)
S/CORR
C/CORR
NEWM


PLAT3 – LANCZOSxNEWMARK T=0.35s
DAMP 0% – EL 8 NO 9 QZ – GRAF. III.3.i
esforco cortante
500
400
300
200
100
0
−100
−200
−300
−400
0.02 0.22 0.42 0.62 0.82 1.02 1.22 1.42 1.62 1.82 2.02 2.22 2.42 2.62 2.82 3.02 3.22 3.42 3.62 3.82
tempo (s)
S/CORR
C/CORR
NEWM


PLAT3 – LANCZOSxNEWMARK T=0.35s
DAMP 0% – EL 8 NO 9 MY – GRAF. III.3.j
flexao
(Thousands)
14
12
10
8
6
4
2
0
−2
−4
−6
−8
−10
−12
−14
−16
0.02 0.22 0.42 0.62 0.82 1.02 1.22 1.42 1.62 1.82 2.02 2.22 2.42 2.62 2.82 3.02 3.22 3.42 3.62 3.82
tempo (s)
S/CORR
C/CORR
NEWM


PLAT3 – COMPARACAO LANCZOSxNEWMARK
DAMP 0% – EL 8 NO 9 MZ – GRAF. III.3.k
flexao
(Thousands)
14
12
10
8
6
4
2
0
−2
−4
−6
−8
−10
−12
−14
0.02
0.22
0.42
0.62
0.82
1.02
1.22
1.42
1.62
1.82
2.02
2.22
2.42
2.62
2.82
3.02
3.22
3.42
3.62
3.82
tempo (s)
S/CORR
C/CORR
NEWM

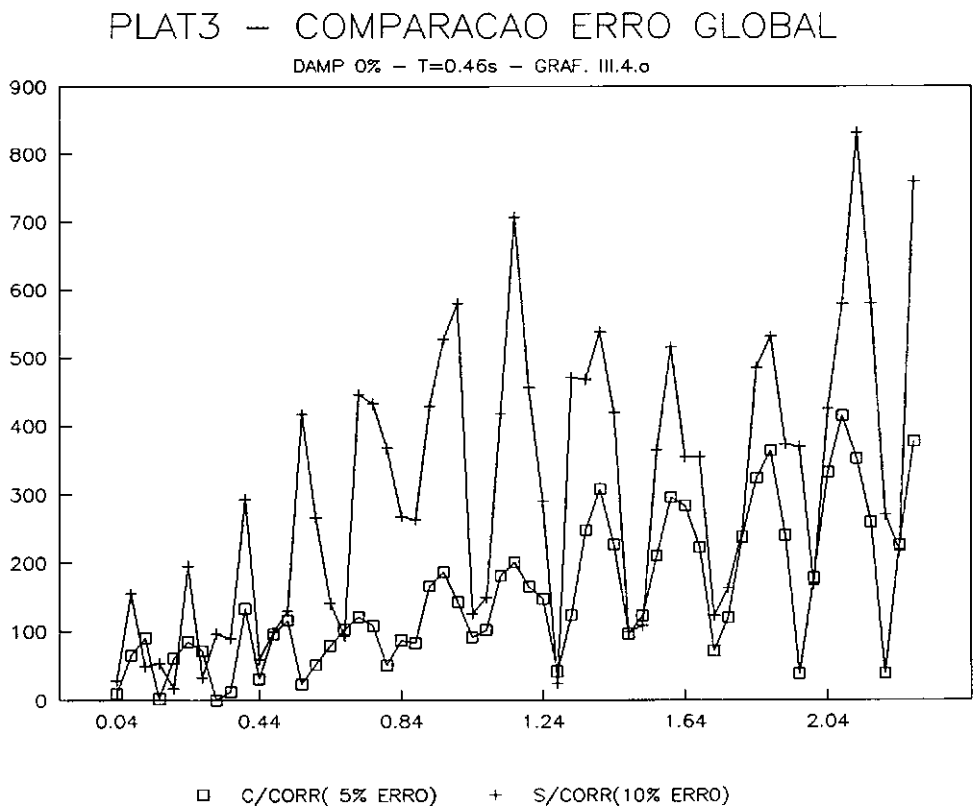
PROCEDIMENTOS PRELIMINARES - PLAT3

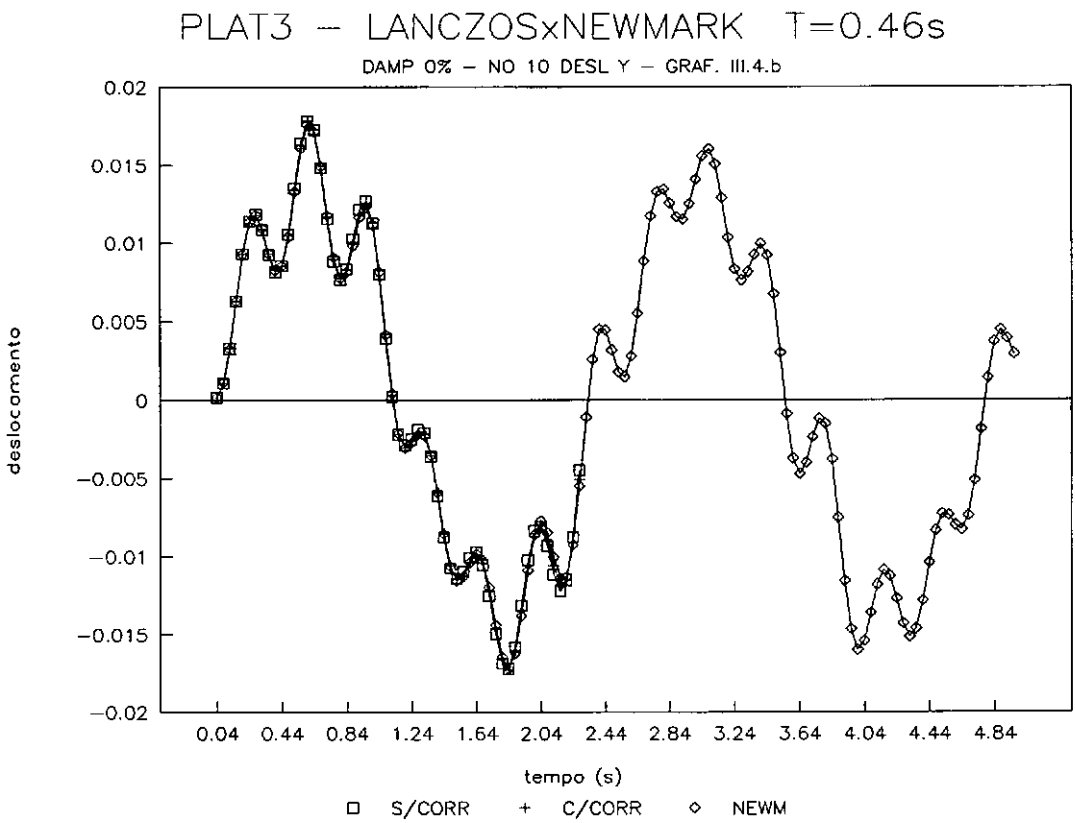
VALORES MÁXIMOS EM MÓDULO - $\bar{T}$=0.46s

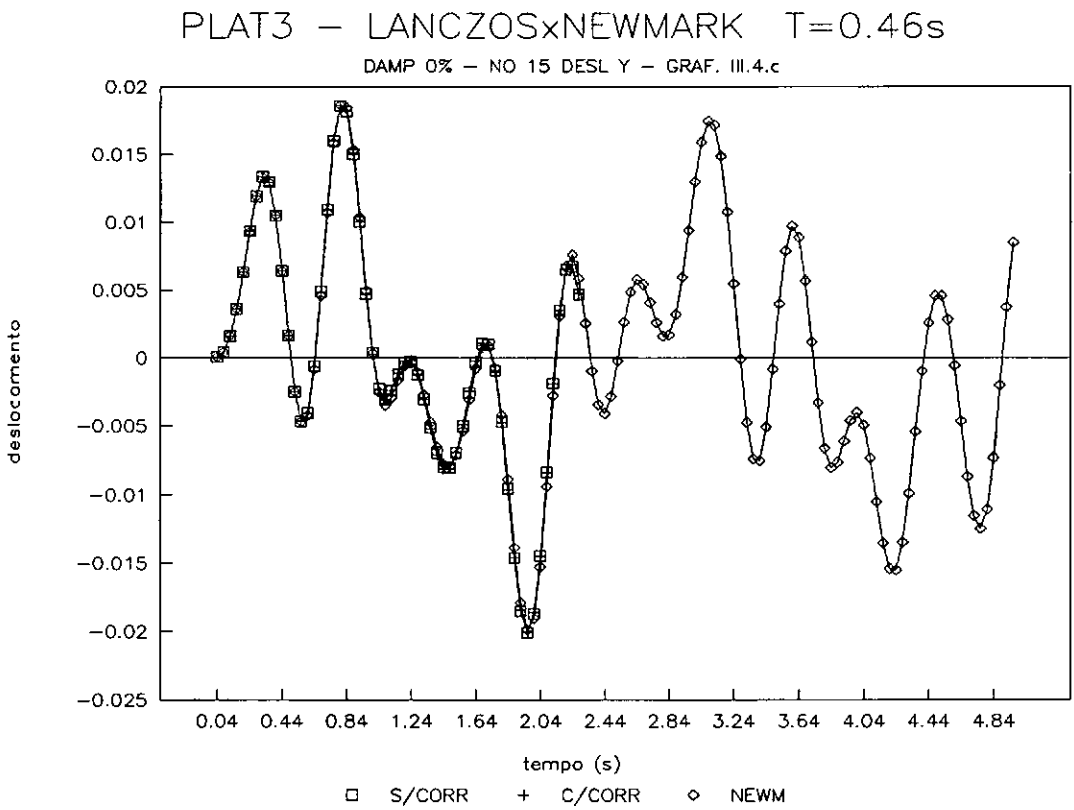
6 MODOS ("SEM CORR.") ERRO 10%
x
7 MODOS ("COM CORR.") ERRO 5%
x
MÉTODO DE INTEGRAÇÃO DIRETA

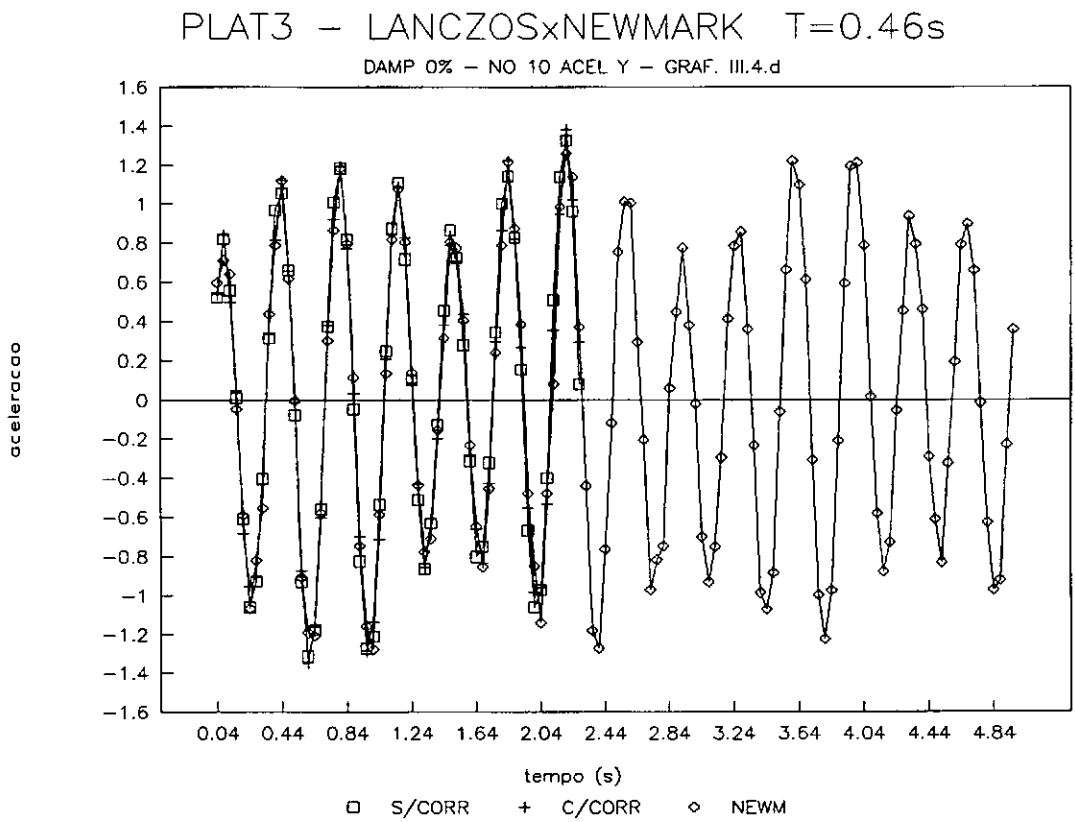
		SEM CORR		COM CORR		MET. DIRETO	
	NO	DESL Y	ACEL Y	DESL Y	ACEL Y	DESL Y	ACEL Y
	1	.189E-1	.109E+1	.188E-1	.113E+1	-	-
	9	.180E-1	.141E+1	.180E-1	.138E+1	-	-
	10	.180E-1	.133E+1	.178E-1	.138E+1	.172E-1	.126E+1
	14	.200E-1	.196E+1	.198E-1	.198E+1	-	-
	15	.201E-1	.196E+1	.200E-1	.192E+1	.199E-1	.191E+1
	21	.266E-2	.373E+0	.282E-2	.467E+0	-	-
EL	NO	NX	QY	NX	QY	NX	QY
1	1	.519E+2	.864E+2	.213E+2	.770E+2	-	-
6	6	.632E+2	.153E+3	.565E+2	.131E+3	-	-
7	7	.499E+2	.117E+0	.276E+2	.123E+0	-	-
8	9	.579E+3	.379E+2	.485E+3	.418E+0	.418E+3	.471E+2
21	4	.486E+3	.844E+3	.546E+3	.846E+3	.533E+3	.829E+3
23	9	.964E+3	.871E+3	.869E+3	874E+3	-	-
		ERRO MÉDIO	307.4	ERRO MÉDIO	151.4		
		DESVIO	202.8	DESVIO	106.8	S/CORR	C/CORR
		RESID (MAX)	619.0 2.12s	RESID (MAX)	354.0 2.08s	=>NÓ 10 DIR.Y	=>NÓ 09 DIR.Y

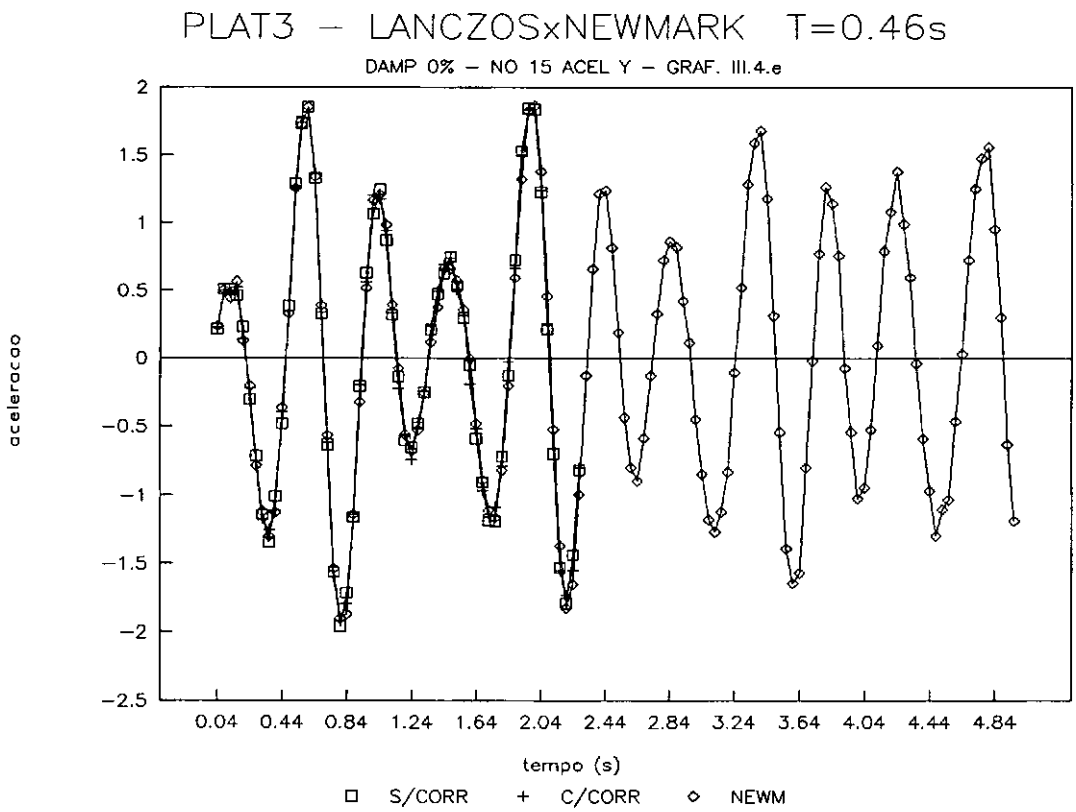
TABELA III.6

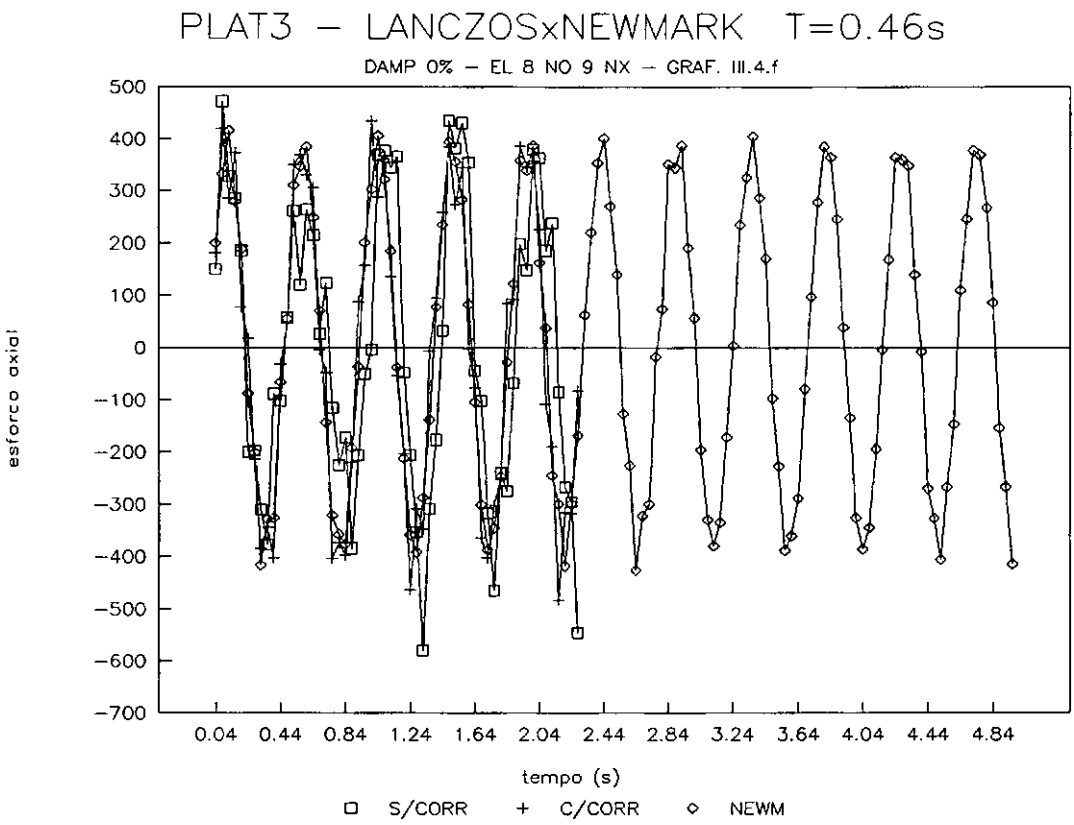

PLAT3 – COMPARACAO ERRO GLOBAL
DAMP 0% – T=0.46s – GRAF. III.4.a
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0.04
0.44
0.84
1.24
1.64
2.04
C/CORR(5% ERRO)
S/CORR(10% ERRO)

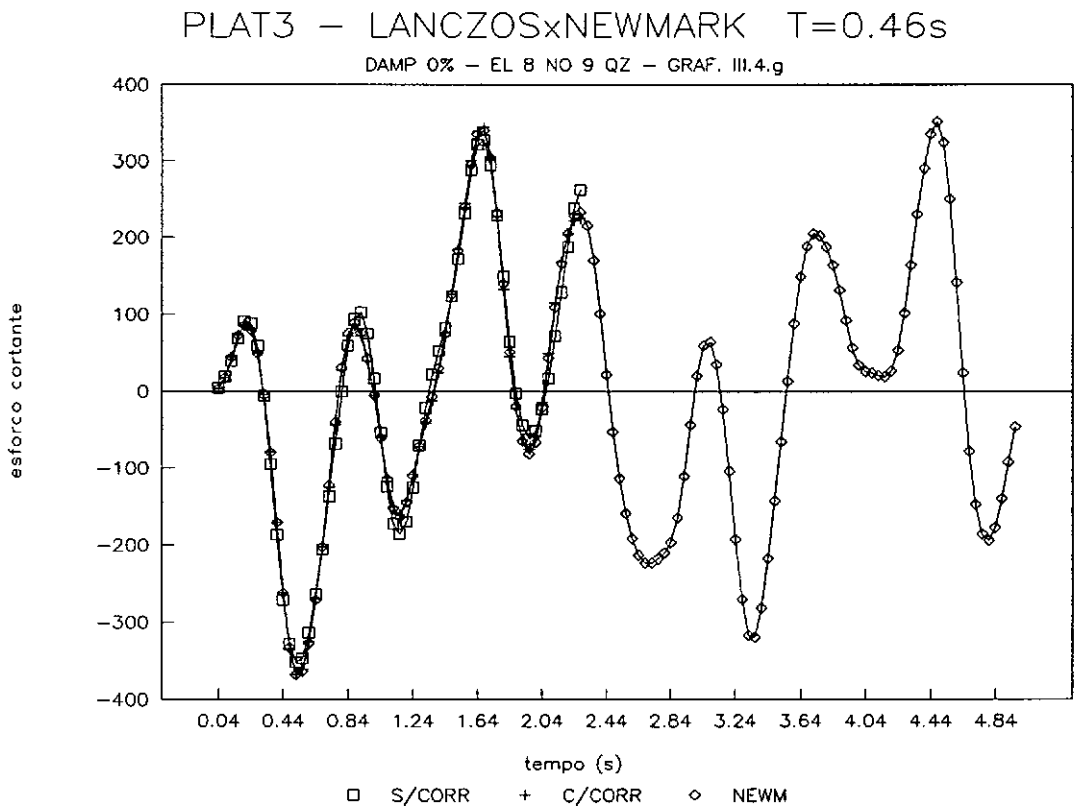

PLAT3 – LANCZOSxNEWMARK T=0.46s
DAMP 0% – NO 10 DESL Y – GRAF. III.4.b
0.02
0.015
0.01
0.005
0
−0.005
−0.01
−0.015
−0.02
deslocamento
0.04
0.44
0.84
1.24
1.64
2.04
2.44
2.84
3.24
3.64
4.04
4.44
4.84
tempo (s)
S/CORR
C/CORR
NEWM

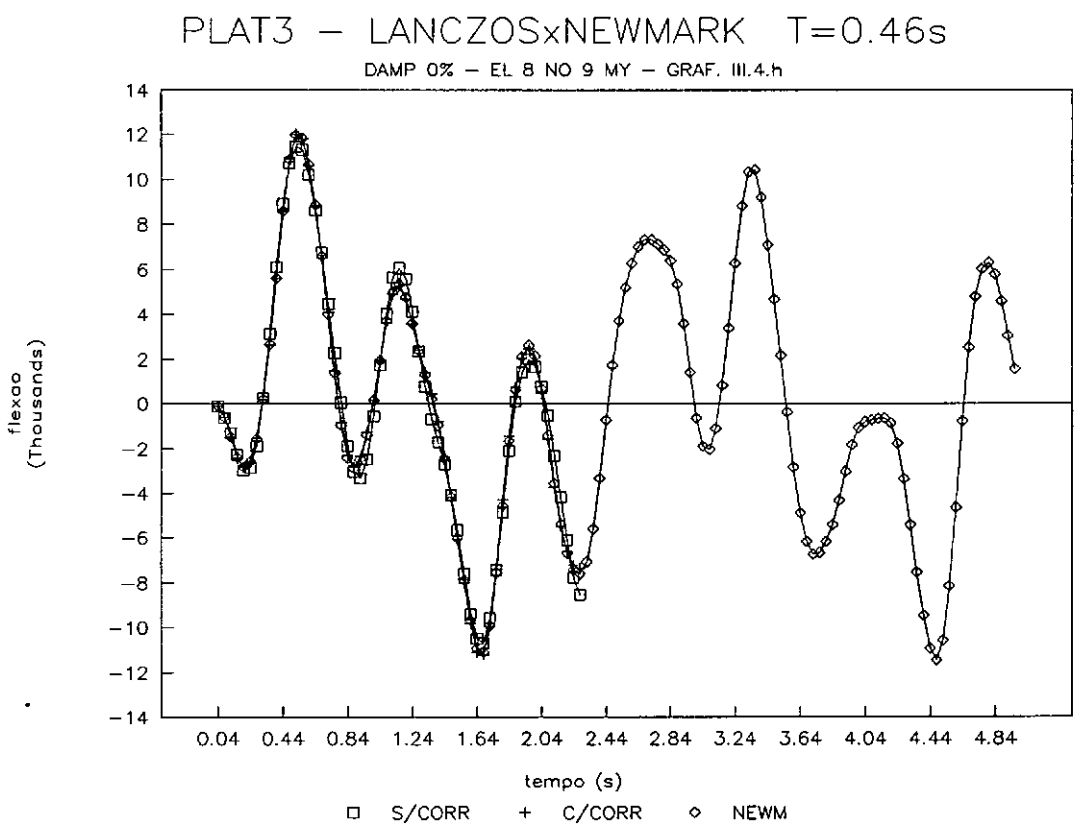

PLAT3 – LANCZOSxNEWMARK T=0.46s
DAMP 0% – NO 15 DESL Y – GRAF. III.4.c
deslocamento
0.02
0.015
0.01
0.005
0
−0.005
−0.01
−0.015
−0.02
−0.025
0.04 0.44 0.84 1.24 1.64 2.04 2.44 2.84 3.24 3.64 4.04 4.44 4.84
tempo (s)
S/CORR
C/CORR
NEWM

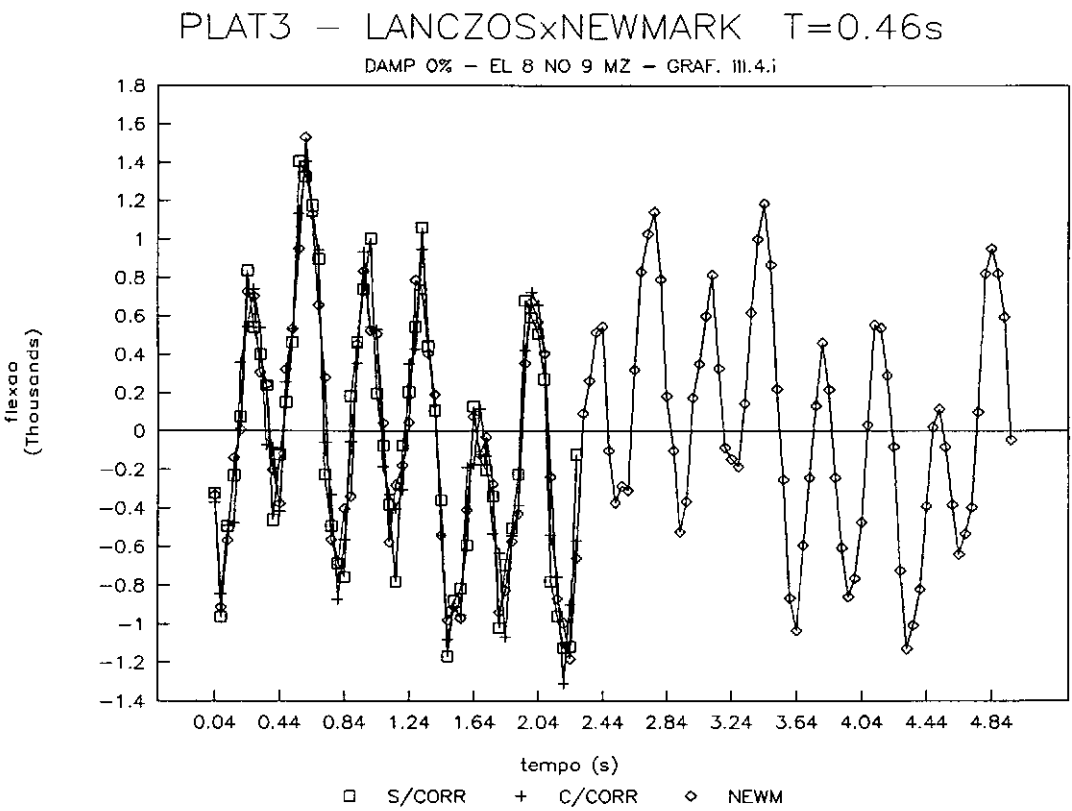

PLAT3 – LANCZOSxNEWMARK T=0.46s
DAMP 0% – NO 10 ACEL Y – GRAF. III.4.d
aceleracao
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
−0.2
−0.4
−0.6
−0.8
−1
−1.2
−1.4
−1.6
0.04 0.44 0.84 1.24 1.64 2.04 2.44 2.84 3.24 3.64 4.04 4.44 4.84
tempo (s)
S/CORR
C/CORR
NEWM

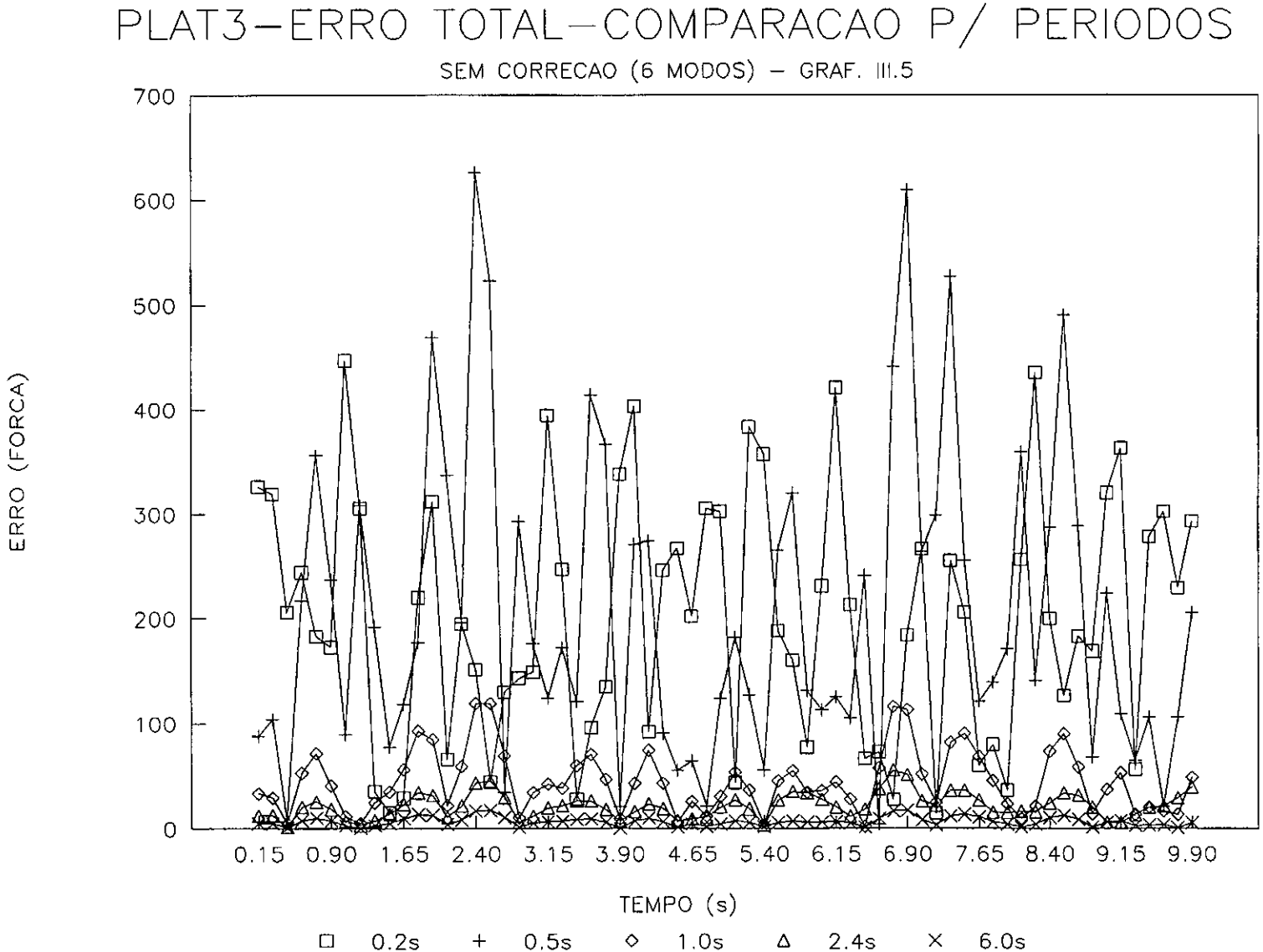

PLAT3 – LANCZOSxNEWMARK T=0.46s
DAMP 0% – NO 15 ACEL Y – GRAF. III.4.e
aceleracao
2
1.5
1
0.5
0
−0.5
−1
−1.5
−2
−2.5
0.04 0.44 0.84 1.24 1.64 2.04 2.44 2.84 3.24 3.64 4.04 4.44 4.84
tempo (s)
S/CORR
C/CORR
NEWM

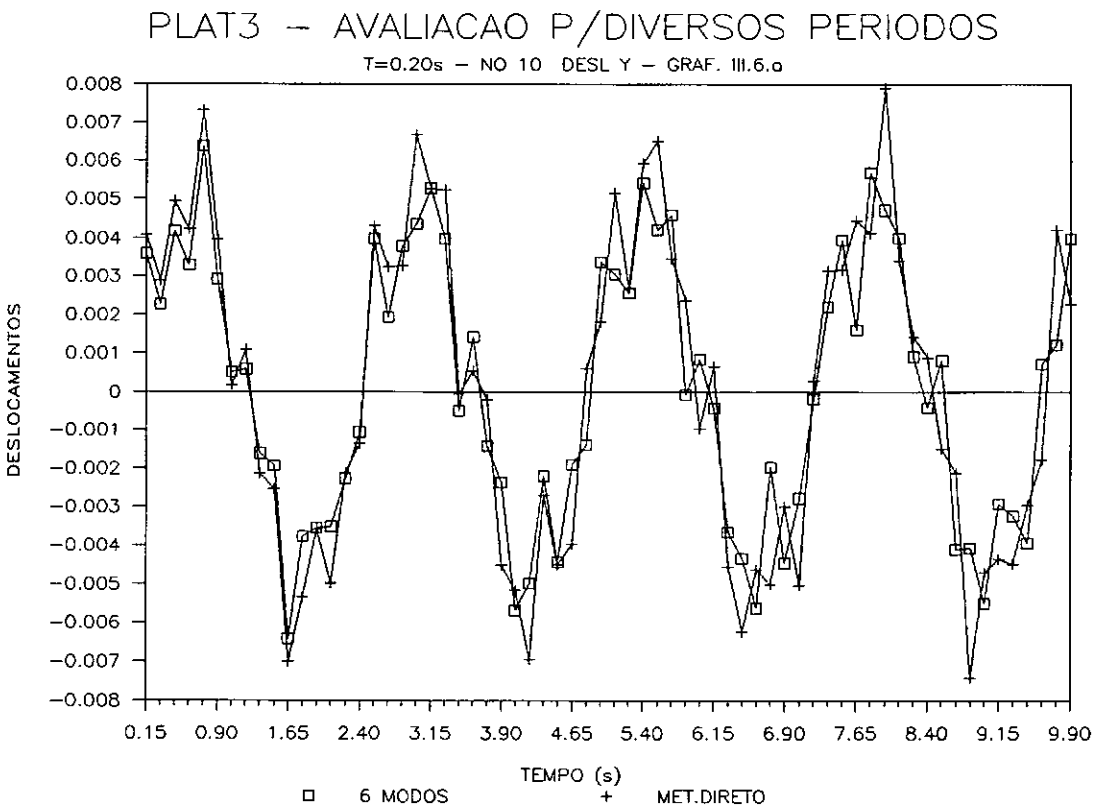

PLAT3 – LANCZOSxNEWMARK T=0.46s
DAMP 0% – EL 8 NO 9 NX – GRAF. III.4.f
esforco axial
500
400
300
200
100
0
−100
−200
−300
−400
−500
−600
−700
0.04 0.44 0.84 1.24 1.64 2.04 2.44 2.84 3.24 3.64 4.04 4.44 4.84
tempo (s)
S/CORR
C/CORR
NEWM

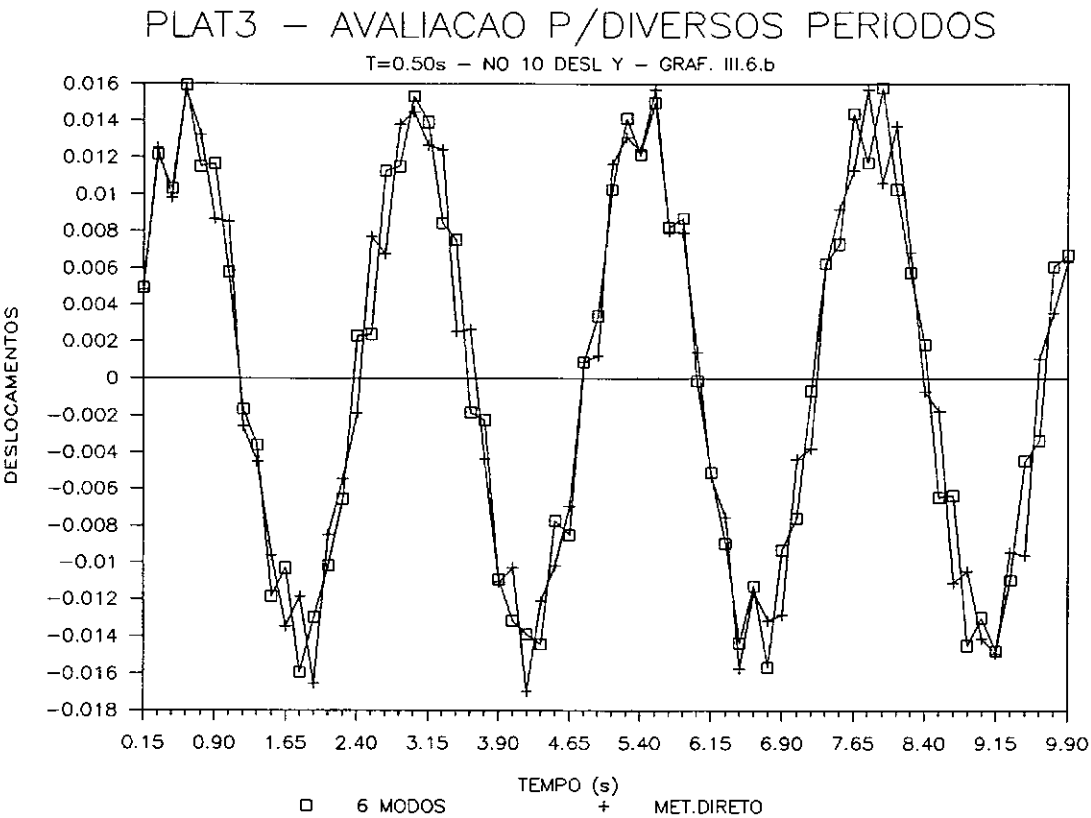

PLAT3 – LANCZOSxNEWMARK T=0.46s
DAMP 0% – EL 8 NO 9 QZ – GRAF. III.4.g
esforco cortante
400
300
200
100
0
−100
−200
−300
−400
0.04 0.44 0.84 1.24 1.64 2.04 2.44 2.84 3.24 3.64 4.04 4.44 4.84
tempo (s)
S/CORR
C/CORR
NEWM

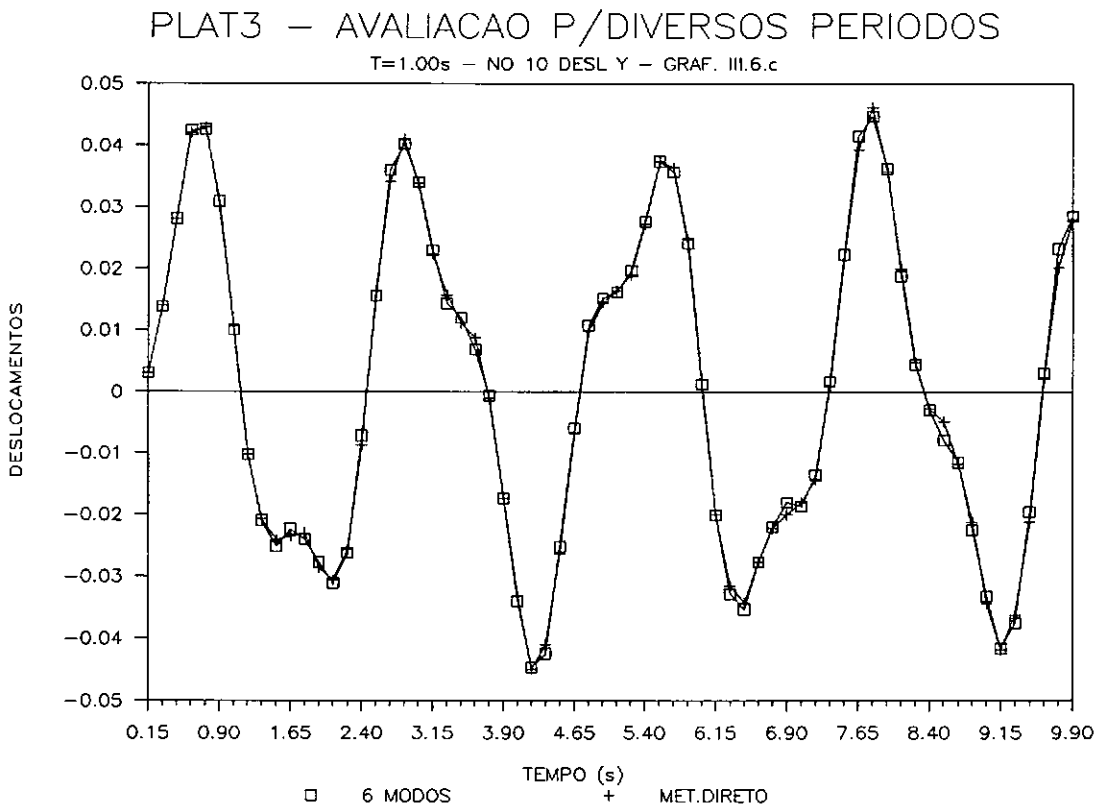

PLAT3 – LANCZOSxNEWMARK T=0.46s
DAMP 0% – EL 8 NO 9 MY – GRAF. III.4.h
flexao
(Thousands)
14
12
10
8
6
4
2
0
−2
−4
−6
−8
−10
−12
−14
0.04 0.44 0.84 1.24 1.64 2.04 2.44 2.84 3.24 3.64 4.04 4.44 4.84
tempo (s)
S/CORR
C/CORR
NEWM

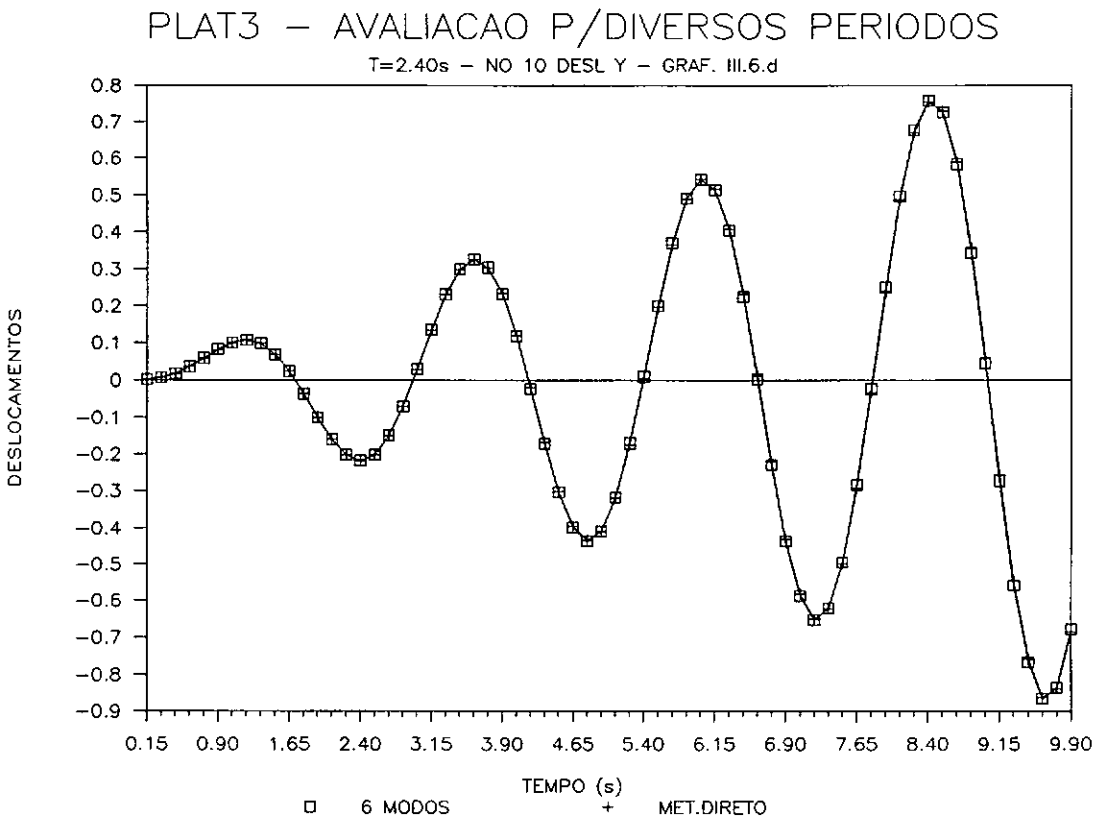

PLAT3 – LANCZOSxNEWMARK T=0.46s
DAMP 0% – EL 8 NO 9 MZ – GRAF. III.4.i
flexao
(Thousands)
1.8
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
−0.2
−0.4
−0.6
−0.8
−1
−1.2
−1.4
0.04
0.44
0.84
1.24
1.64
2.04
2.44
2.84
3.24
3.64
4.04
4.44
4.84
tempo (s)
S/CORR
C/CORR
NEWM

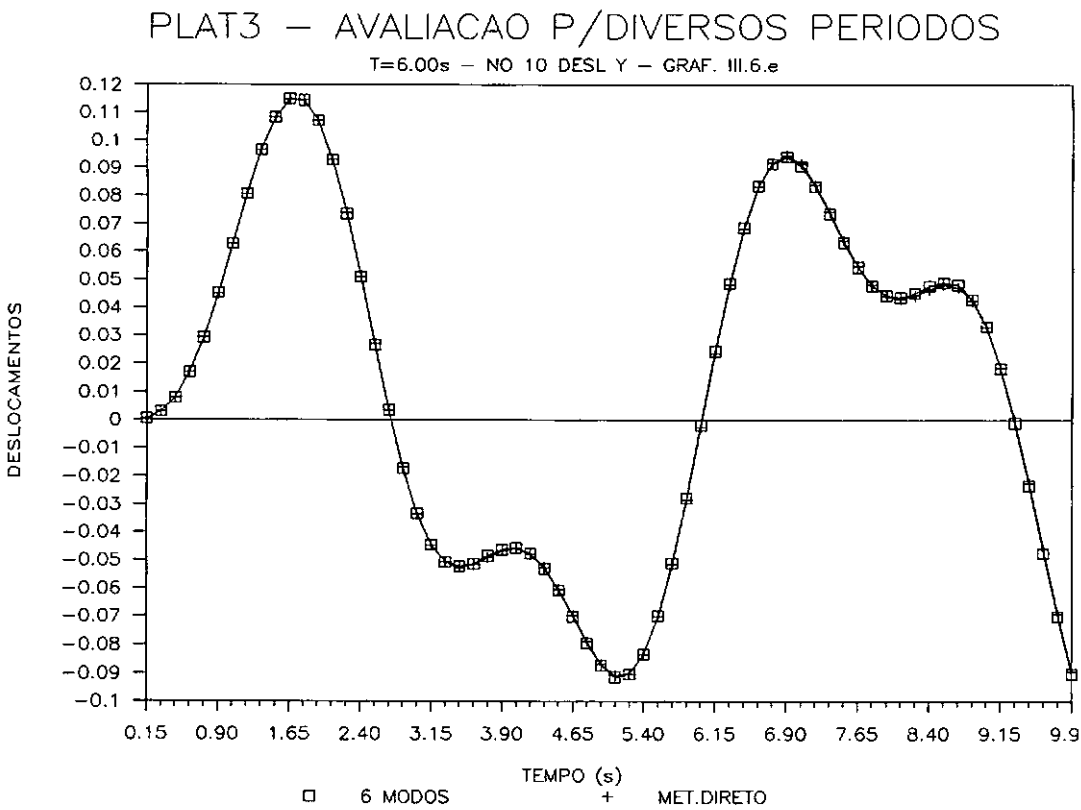

PLAT3-ERRO TOTAL-COMPARACAO P/ PERIODOS
SEM CORRECAO (6 MODOS) - GRAF. III.5
ERRO (FORCA)
700
600
500
400
300
200
100
0
0.15 0.90 1.65 2.40 3.15 3.90 4.65 5.40 6.15 6.90 7.65 8.40 9.15 9.90
TEMPO (s)
0.2s
0.5s
1.0s
2.4s
6.0s

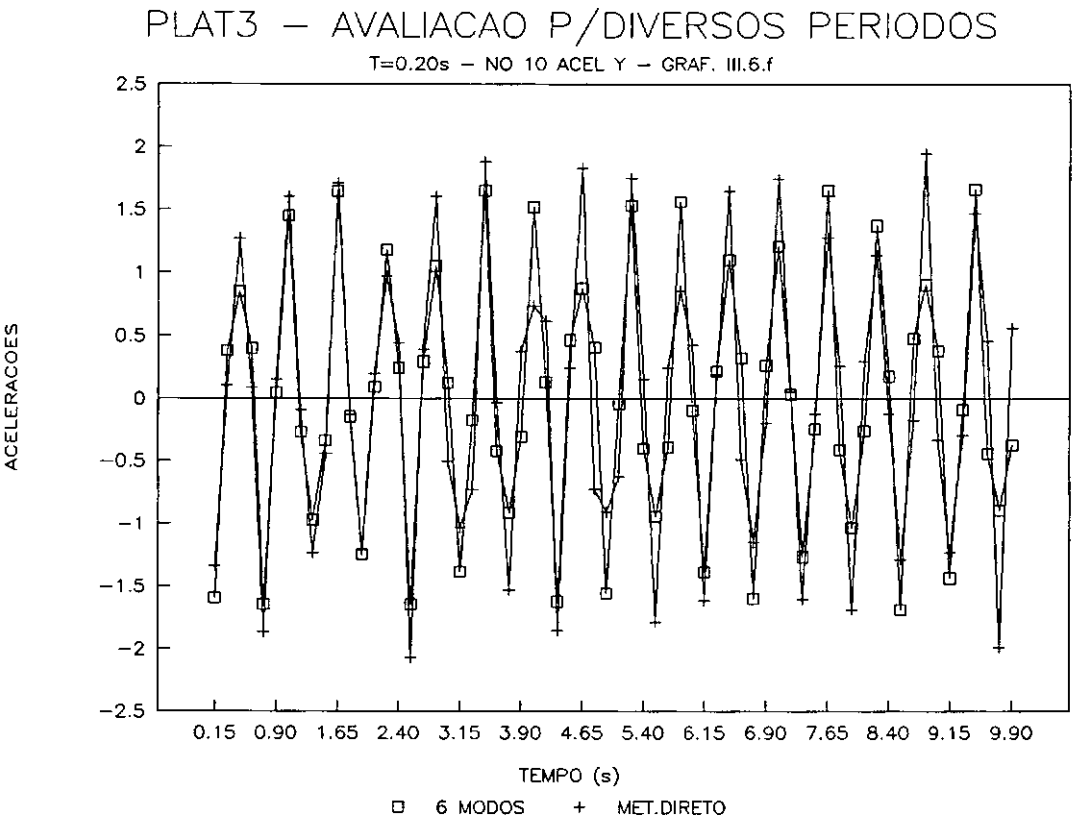

PLAT3 – AVALIACAO P/DIVERSOS PERIODOS
T=0.20s – NO 10 DESL Y – GRAF. III.6.a
DESLOCAMENTOS
0.008
0.007
0.006
0.005
0.004
0.003
0.002
0.001
0
−0.001
−0.002
−0.003
−0.004
−0.005
−0.006
−0.007
−0.008
0.15 0.90 1.65 2.40 3.15 3.90 4.65 5.40 6.15 6.90 7.65 8.40 9.15 9.90
TEMPO (s)
6 MODOS
MET.DIRETO

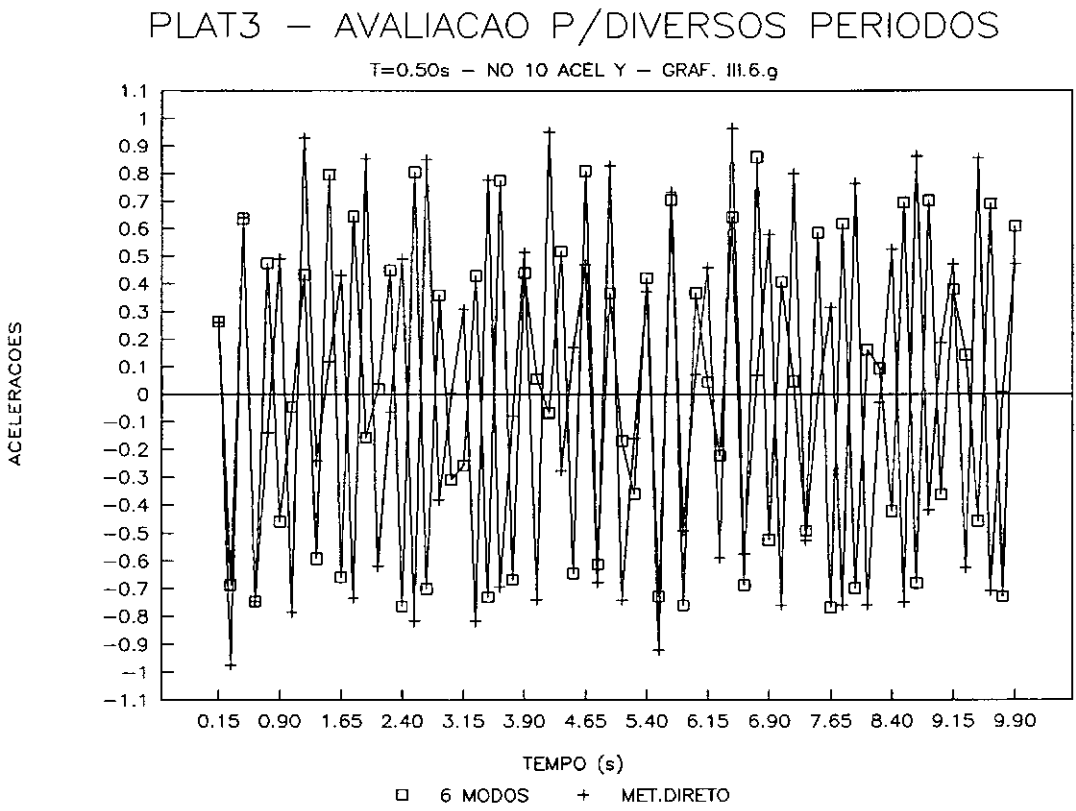

PLAT3 – AVALIACAO P/DIVERSOS PERIODOS
T=0.50s – NO 10 DESL Y – GRAF. III.6.b
DESLOCAMENTOS
0.016
0.014
0.012
0.01
0.008
0.006
0.004
0.002
0
−0.002
−0.004
−0.006
−0.008
−0.01
−0.012
−0.014
−0.016
−0.018
0.15 0.90 1.65 2.40 3.15 3.90 4.65 5.40 6.15 6.90 7.65 8.40 9.15 9.90
TEMPO (s)
6 MODOS
MET.DIRETO

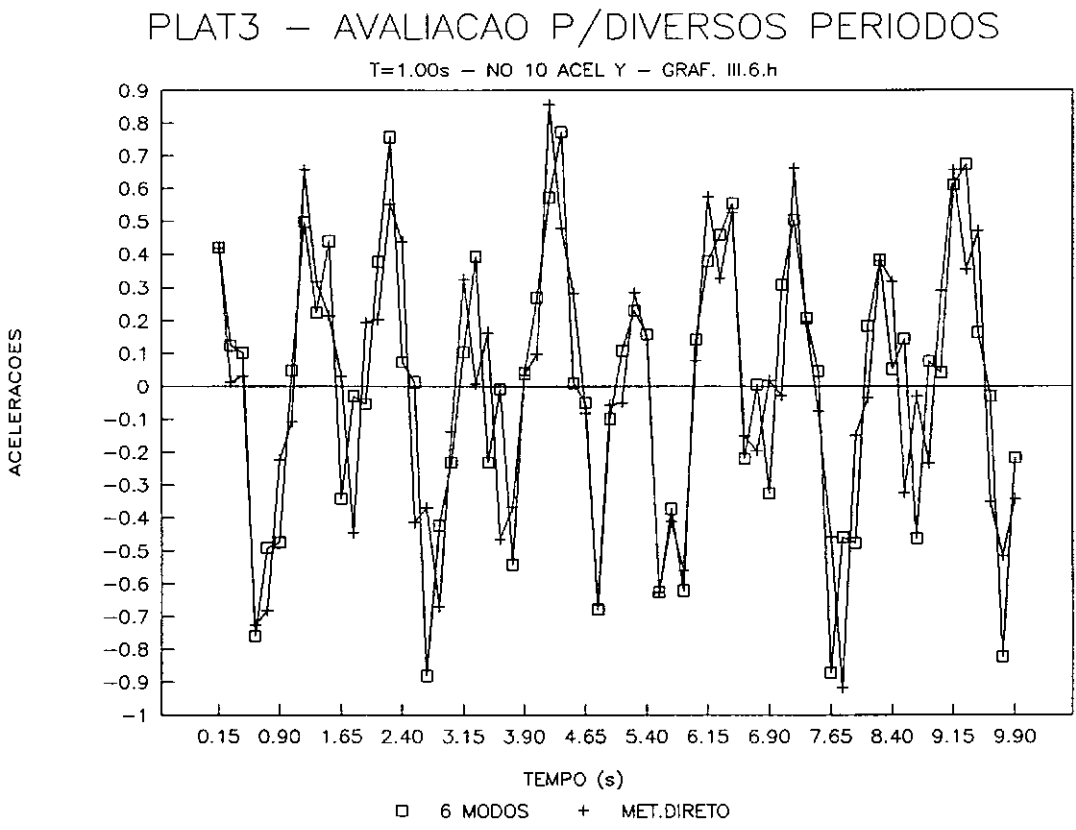

PLAT3 – AVALIACAO P/DIVERSOS PERIODOS
T=1.00s – NO 10 DESL Y – GRAF. III.6.c
DESLOCAMENTOS
0.05
0.04
0.03
0.02
0.01
0
−0.01
−0.02
−0.03
−0.04
−0.05
0.15 0.90 1.65 2.40 3.15 3.90 4.65 5.40 6.15 6.90 7.65 8.40 9.15 9.90
TEMPO (s)
6 MODOS
MET.DIRETO

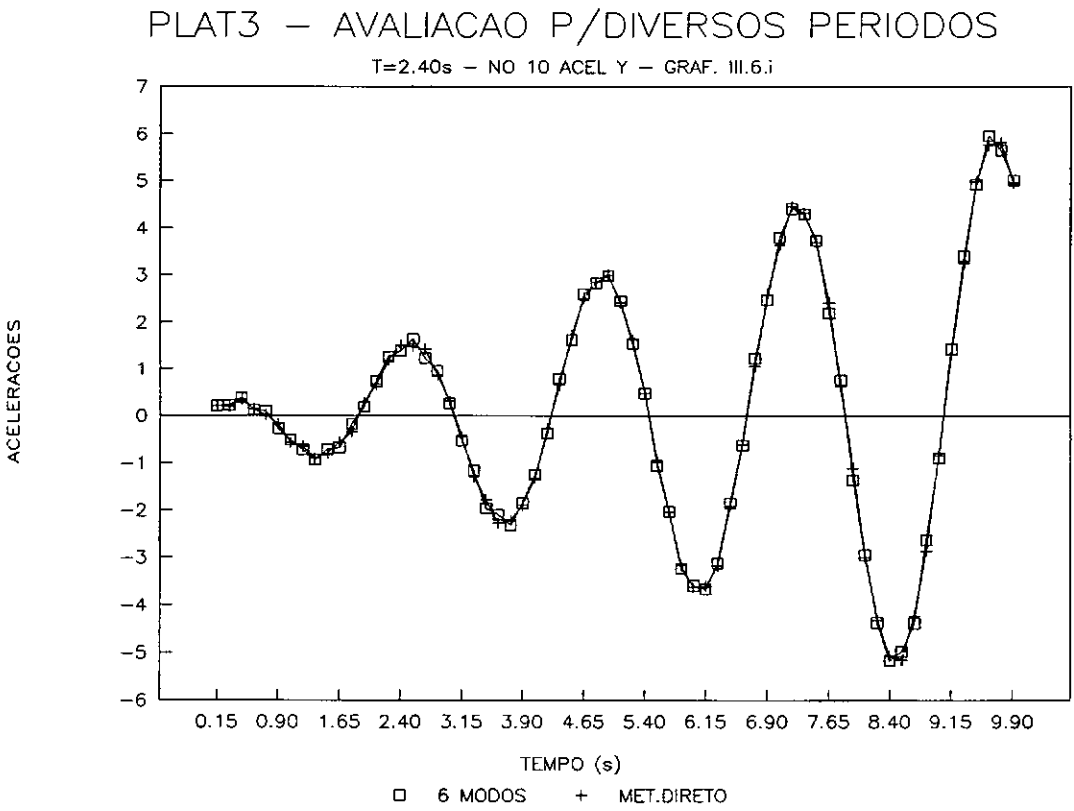

PLAT3 – AVALIACAO P/DIVERSOS PERIODOS
T=2.40s – NO 10 DESL Y – GRAF. III.6.d
DESLOCAMENTOS
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
−0.1
−0.2
−0.3
−0.4
−0.5
−0.6
−0.7
−0.8
−0.9
0.15 0.90 1.65 2.40 3.15 3.90 4.65 5.40 6.15 6.90 7.65 8.40 9.15 9.90
TEMPO (s)
6 MODOS
MET.DIRETO

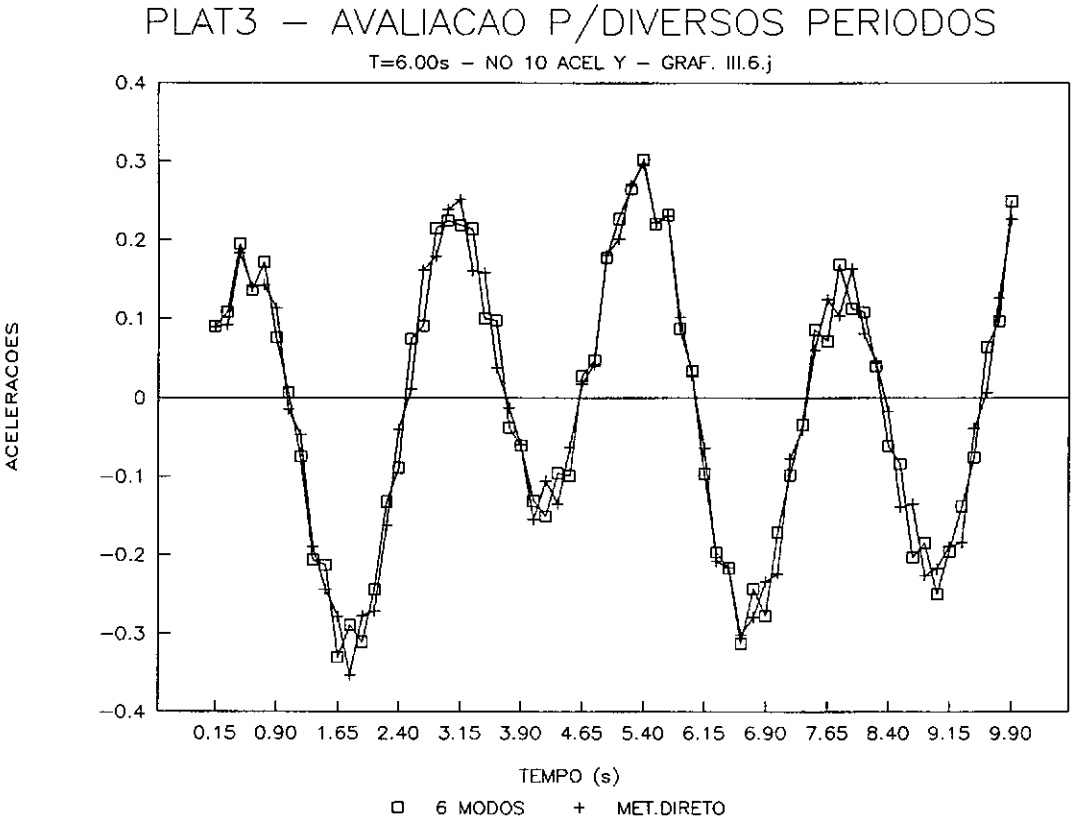

PLAT3 – AVALIACAO P/DIVERSOS PERIODOS
T=6.00s – NO 10 DESL Y – GRAF. III.6.e
DESLOCAMENTOS
0.12
0.11
0.1
0.09
0.08
0.07
0.06
0.05
0.04
0.03
0.02
0.01
0
−0.01
−0.02
−0.03
−0.04
−0.05
−0.06
−0.07
−0.08
−0.09
−0.1
0.15 0.90 1.65 2.40 3.15 3.90 4.65 5.40 6.15 6.90 7.65 8.40 9.15 9.90
TEMPO (s)
6 MODOS
MET.DIRETO


PLAT3 – AVALIACAO P/DIVERSOS PERIODOS
T=0.20s – NO 10 ACEL Y – GRAF. III.6.f
ACELERACOES
2.5
2
1.5
1
0.5
0
−0.5
−1
−1.5
−2
−2.5
0.15 0.90 1.65 2.40 3.15 3.90 4.65 5.40 6.15 6.90 7.65 8.40 9.15 9.90
TEMPO (s)
6 MODOS
MET.DIRETO


PLAT3 – AVALIACAO P/DIVERSOS PERIODOS
T=0.50s – NO 10 ACEL Y – GRAF. III.6.g
ACELERACOES
TEMPO (s)
6 MODOS
MET.DIRETO


PLAT3 – AVALIACAO P/DIVERSOS PERIODOS
T=1.00s – NO 10 ACEL Y – GRAF. III.6.h
ACELERACOES
TEMPO (s)
6 MODOS
MET.DIRETO


PLAT3 – AVALIACAO P/DIVERSOS PERIODOS
T=2.40s – NO 10 ACEL Y – GRAF. III.6.i
ACELERACOES
7
6
5
4
3
2
1
0
−1
−2
−3
−4
−5
−6
0.15 0.90 1.65 2.40 3.15 3.90 4.65 5.40 6.15 6.90 7.65 8.40 9.15 9.90
TEMPO (s)
6 MODOS
+ MET.DIRETO


PLAT3 – AVALIACAO P/DIVERSOS PERIODOS
T=6.00s – NO 10 ACEL Y – GRAF. III.6.j
ACELERACOES
0.4
0.3
0.2
0.1
0
−0.1
−0.2
−0.3
−0.4
0.15 0.90 1.65 2.40 3.15 3.90 4.65 5.40 6.15 6.90 7.65 8.40 9.15 9.90
TEMPO (s)
6 MODOS
+ MET.DIRETO

III.3 - Conclusões:

Para a faixa de períodos de excitação pouco abaixo do 1º período natural da estrutura, a simples observância do Critério 1 (TABELA II.1) de parada obtem bons resultados. Essa faixa se estende até a primeira metade dos períodos modais.

A partir daí, o Critério 2b se faz necessário, ampliando essa faixa até os primeiros 3/4 dos modos.

No entanto, para os períodos coincidentes com os dois últimos modos as respostas se apresentam ruins, com uma caracterização de "pseudo-ressonância".

Portanto, o ideal consiste no fato de manter o máximo de afastamento possível entre os últimos períodos modais e o período de excitação. Assim, a busca de um algoritmo mais rigoroso na ortogonalização da base, permitindo alcançar períodos mais baixos, deve resultar na melhora dos resultados.

É necessário, portanto, que se mantenha um controle no fator de participação de carga e massa efetiva para que não ocorram valores maiores que 1.0 nesses casos, o que implicaria numa perda de qualidade. Por isso não é possível gerar um grande número de vetores, principalmente sem preocupar-se com a manutenção da ortogonalização da base, mantendo o F.P.C. e massa efetiva menor que 1.0. É visível que com o algoritmo original, o F.P.C. iria rapidamente ultrapassar o valor unitário, resultando numa resposta de baixa qualidade.

CAPÍTULO IV

PROCEDIMENTOS AVANÇADOS

IV.1 - Descrição:

Em função do que foi observado no capítulo anterior, partiu-se para a determinação de procedimentos que permitissem ao Método de Superposição dos Modos de Lanczos atuar, com qualidade garantida, até numa região de baixos períodos de excitação, região esta tomada em relação ao período natural da estrutura. Então, a denominação de procedimentos avançados enfeixa as experiências que tiveram sucesso no capítulo anterior, bem como a procura por uma base mais rica, com maior número de vetores e alcançando períodos modais mais baixos possíveis. Porém, o aumento de vetores na base obriga um melhor controle do processo de ortogonalização desses vetores para melhorar a qualidade da base.

Modelo:

Para teste mais exigente do comportamento dos algoritmos e parâmetros, utilizamos um modelo de pórtico espacial com 456 graus de liberdade simulando uma plataforma de 8 pernas, com molas na região inferior representando o comportamento do solo nas 3 direções globais X, Y e Z. As estacas se prolongam até o topo da jaqueta com pontos de contato com as pernas nos níveis das mesas da jaqueta, e o convés foi simplificado em apenas um nível com manutenção aproximada de suas

características (massa , rigidez) através de concentração de massas e utilização de membros com características fictícias. O modelo real em que foi baseado, foi submetido à análise sísmica, tendo sido obtidos 50 modos de Lanczos através do programa "SESAM" [10], permitindo a comparação dos principais modos de vibração de um e outro modelo para verificação de suas características e comportamentos. Foi mantida a denominação original da estrutura: TEAK.

As características geométricas, modos de vibração do modelo utilizado e do modelo original estão apresentados no Anexo "A". As unidades utilizadas são libras (lb) e polegadas (pol).

Foi aplicado ao modelo um carregamento senoidal na direção "Y" global (direção mais estreita do modelo) com períodos variando em toda faixa de períodos abaixo do primeiro período natural da estrutura. O carregamento tem característica global, aplicado nas quatro pernas da face "+Y" (Elevação "A") na região das quatro mesas a partir do topo da jaqueta, sem defasagem e amplitude total máxima de 30000 lb. Por elevação temos os seguintes valores acumulados:

ELEV. (pol)	Σ CARGA (lb)
2910	15000
1908	9000
1308	4000
708	2000

Foi utilizado um valor de amortecimento de 0.5% do amortecimento crítico, de forma que se pode desconsiderar a

parcela devida ao amortecimento no cálculo de erro.

Normalmente foram colhidas informações, para elaboração de gráficos e tabelas, do nó 63 (com resíduos significativos e nó de aplicação de carga) e do elemento 104 (ligado a este nó e na direção do vetor de carga aplicado no nó 63).

Como critério para a escolha dos períodos de excitação, adotou-se a coincidência com os períodos modais extraídos das diversas análises (ver TABELA IV.2).

Procedimentos:

Para esse novo modelo, com características bastante diversas em relação ao utilizado no capítulo anterior, as experiências se iniciaram com análises utilizando o Critério de parada 1 ("Sem correção"), obtendo 6 modos com ALGORITMO II.1 (Algoritmo Original), com fator de participação de cargas de 0.555 e massa efetiva global de 92.7%, este último sendo o restritor do critério de parada. A seguir, o Critério de parada 2b ("Com correção" 5% erro) foi tentado, obtendo 7 modos no algoritmo original, F.P.C. de 0.657 e massa efetiva global de 95.6%.

Neste ponto, as investigações se detiveram na região próxima ao período modal mais baixo alcançado: 0.04s. Com o emprego de um intervalo de tempo de análise de 0.001s, impressão de resultados a cada dois intervalos de integração e apenas 2 ciclos de carga, foi feito um estudo para teste de algoritmos mais eficientes. Assim, foram testados:

* Critério 3 "Com correção"(HP), resultando em 11 modos

ainda no Algoritmo Original, fator de participação de cargas de 0.954 e massa efetiva global de 99.7%.

* Critério 4, com o emprego do Algoritmo II.2 (Algoritmo 08) e diferentes números de modos (15 e 18) já que o número de vetores pedidos foi o restritor no critério de parada. Para 15 modos, atingiu-se um F.P.C. de 0.980 e massa efetiva global de 97.1%. Para 18 modos, obteve-se um F.P.C. de 0.984 e massa efetiva global de 97.5%.

* Critério 5, usando o ALGORITMO II.3 (Algoritmo 10) com 15 modos e F.P.C. de 0.807 e massa efetiva global de 97.1%.

A partir daí, dois critérios com filosofias diferentes ainda foram testados no período $\bar{T}$=0.08s (Critérios 3 e 4), e a seguir só o Critério 4 com 18 modos foi aplicado para os demais períodos de excitação.

Com os procedimentos adotados neste capítulo, verifica-se que através da ortogonalização completa da base é possível atingir elevado número de vetores, e indispensável, nestas condições, para assegurar a qualidade da resposta, representado pelo F.P.C. e massa efetiva abaixo da unidade.

Quanto à coleta de informação, além dos parâmetros de qualidade, os esforços mais importantes de um membro estrutural significativo e deslocamentos de um nó da mesma região serão apresentados para permitir a verificação da qualidade da resposta, não apenas na direção do carregamento, mas em todos os graus de liberdade associados a esse nó, cuja resposta tenha amplitude significativa. Também procura-se

avaliar, para este novo modelo, os parâmetros de qualidade para definição dos valores destes como indicativos de qualidade da resposta, e seus comportamentos ao longo do tempo.

Cabe ressaltar que os períodos de excitação mais baixos foram pesquisados no mínimo de 5 ciclos de carregamento, exceto para $\bar{T}$=0.04s que teve apenas dois ciclos de análise. Posteriormente, foram estudados até 10 ciclos de carregamento para avaliação do comportamento dos resultados ao longo do tempo, e também dos parâmetros.

IV.2 - Resultados e comentários:

O conjunto completo de tabelas e gráficos encontra-se ordenado no final deste item. Os gráficos mais significativos foram inseridos ao longo do texto.

De forma similar ao capítulo anterior, a TABELA IV.1 apresenta o resumo de todas as análises feitas com o modelo com a avaliação do Erro Médio, Desvio e Máximo Resíduo para toda a faixa de períodos a que foi submetida a estrutura, e a TABELA IV.2 apresenta os períodos modais, fatores de participação de carga e massa efetiva para os diversos critérios usados no modelo.

Com a observação da TABELA IV.1, constata-se a variação nos valores de Erro Médio e demais parâmetros para um número de ciclos diferentes dentro de um mesmo período de excitação. Isso demonstra que há uma degeneração na resposta com o decorrer da análise. Essa degeneração pode ser um pequeno, porém tolerável, incremento no erro, talvez mais em função de aproximações no passo de integração ao tentar se atingir um número de ciclos maior, do que propriamente uma perda na acurácia da resposta. Ou pode ser resultado da perda de precisão na resposta quando da tentativa de equilibrar a equação de movimento. Assim, além da variação do número de ciclos dentro de cada período de carga, o estudo da tendência da evolução do erro é apresentada nos GRÁFICOS IV.1, com o delineamento dos valores de erro e resíduos no nó 63 para os diversos períodos de excitação ($\bar{T}$=0.08s, 0.12s, 0.17s e 0.35s) e para quantidade de ciclos diferentes.

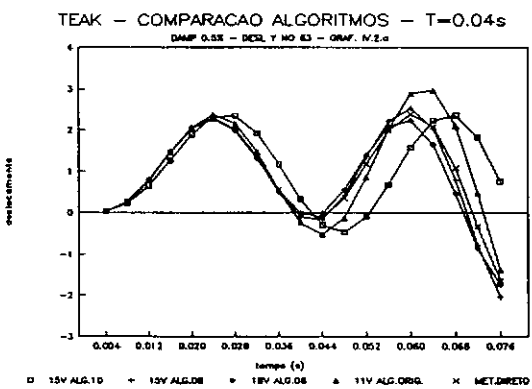
Agregando-se a informação da TABELA IV.1 aos GRÁFICOS

IV.1, observa-se que a maior contribuição no valor do erro não vem só do resíduo na direção do carregamento (direção "Y"). Vê-se que os maiores resíduos ocorrem na direção "Z" (global), provavelmente em função das características do modelo com molas na direção vertical na simulação das estacas, discretização de massas com elevado valor na direção "Z" global, distribuição do carregamento , representação simplificada do convés e elevada representação modal das massas em todas as direções, diferentemente do apresentado no modelo PLAT3.

Deve ser ressaltado que o surgimento de gráficos, com maior número de ciclos, que apresentam um aspecto diferente do equivalente com quantidade de ciclos menores, é decorrente da modificação no intervalo de cálculo de erro e integração, no intuito de se alcançar um tempo final maior, em função da limitação do espaço de memória para o processamento. No entanto, como pode ser observado, os gráficos tendem a se apresentar como uma "envoltória" dos gráficos com menos ciclos, apontando a amplificação ou não do erro com o decorrer do tempo. Essa "envoltória", obviamente, diminuiu os detalhes apresentados anteriormente, produzindo modificação no valor do Erro Médio e demais parâmetros.

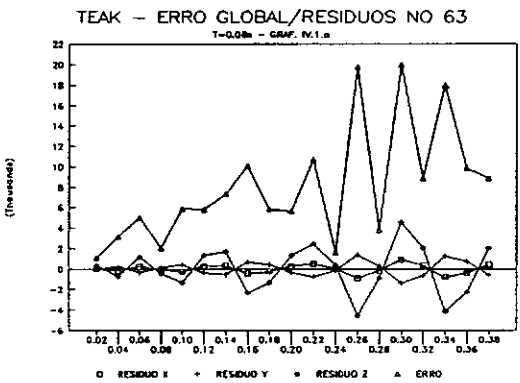
Essa modificação, normalmente para valores superiores (para a média), deve ser tão maior quanto mais baixo for o período do carregamento (uma vez que a função erro apresenta flutuações mais fortes) e maior o intervalo de tempo para cálculo de erro e de integração, pela imprecisão induzida nos cálculos tanto do erro (pela supressão de pontos intermediários ao se aumentar o número de passos para efeito

de avaliação do erro), quanto da resposta. Porém, realizando uma observação cruzada das TABELAS IV.1 e GRÁFICOS IV.1, vemos que os valores de Erro Médio, Desvio do Erro e Máximo Resíduo que mais se alteraram foram para o caso de $\bar{T}$=0.17s, onde já se observava uma tendência de crescimento no GRÁFICO IV.1.c, tendência essa confirmada no GRÁFICO IV.1.f. Além de não ser o menor período analisado para 10 ciclos de carregamento (o menor é 0.12s), teve menor alteração no intervalo de tempo apenas para cálculo de erro (o intervalo de integração foi mantido em 0.01s e o passo é que foi aumentado de 4 para 6) do que o caso para $\bar{T}$=0.12s, que teve variação de 0.02s para 0.05s (uma vez que o intervalo de integração foi mantido em 0.005s alterando-se apenas o passo para cálculo de erro de 4 para 10). Assim, podemos afirmar que o aumento no valor dos parâmetros de erro decorrentes das alterações no intervalo de tempo para o cálculo do erro e integração foi de pequena monta.



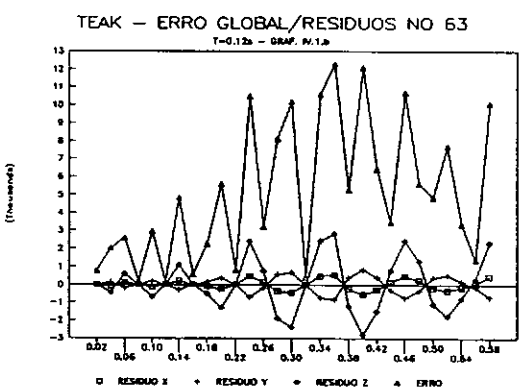
Ainda sobre a evolução do erro ao longo do tempo, é interessante observar que no caso $\bar{T}$=0.04s, em apenas 2 ciclos já se percebe uma degeneração na resposta para todos os critérios, suficiente para apontar a má qualidade através do Erro Médio, Desvio e Máximo Resíduo, ou pelos deslocamentos do nó 63 e esforços no elemento 104, para os diversos algoritmos de

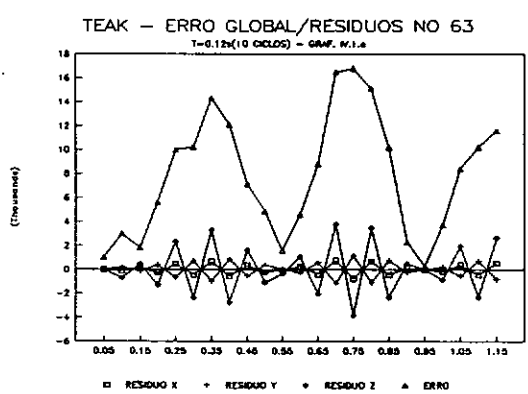
geração da base e método de integração direta, apresentados nos GRÁFICOS IV.2.



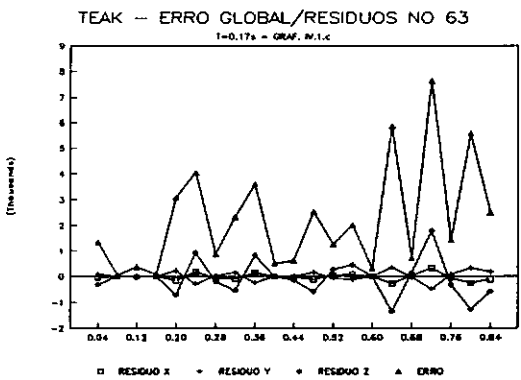
Para $\bar{T}$=0.08s, a verificação em cima de 5 ciclos apresentou uma indicação de erro apontando para uma baixa qualidade. Observando os gráficos, é visível a degeneração na resposta. O GRÁFICO IV.1.a apresenta uma tendência de amplificação no erro e resíduos.

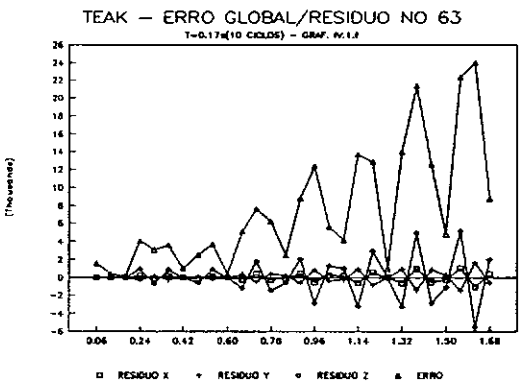
Para $\bar{T}$=0.12s, primeiramente analisou-se para 5 ciclos e, posteriormente, 10 ciclos. Para 10 ciclos observa-se uma estabilidade na evolução do erro e resíduos (GRÁFICOS IV.1), bem como nos deslocamentos e esforços (GRÁFICOS IV.6).



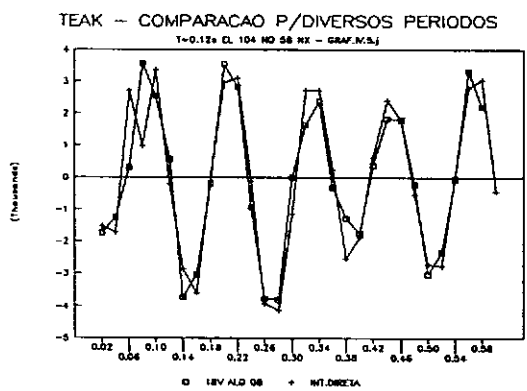


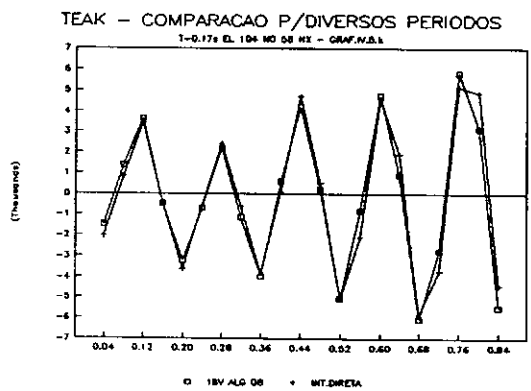
O Erro Médio nos indica uma resposta com qualidade melhor do que para $\bar{T}$=0.08s, o que pode ser comprovado pela visualização dos deslocamentos e esforços nos GRÁFICOS IV.5 e IV.6.



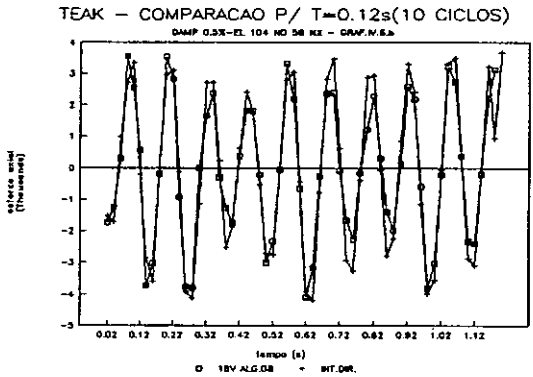


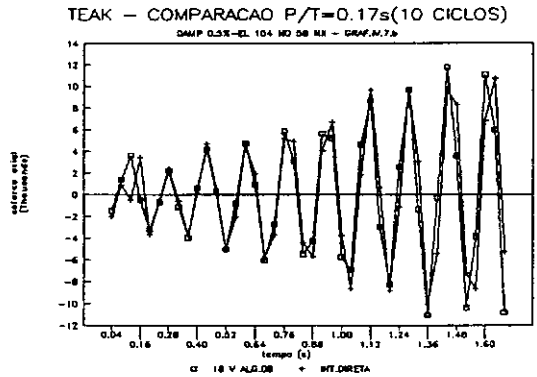
Para $\bar{T}$=0.17s, a análise em 5 ciclos apresentou tendência de crescimento no erro, fato este confirmado com a análise para 10 ciclos, conforme mencionado anteriormente. No entanto, o comportamento elástico da resposta para esse período se apresentou com diferenças menores em relação à solução do método de integração direta do que o observado para $\bar{T}$=0.12s, apenas apresentando uma resposta não muito boa para os deslocamentos e esforços com menor ordem de grandeza (ver GRÁFICOS IV.5 e IV.7). O erro e os resíduos no nó 63 só apresentaram uma discreta estabilização nos últimos ciclos, como pode ser observado nos GRÁFICOS IV.1.f. É ressaltado, a seguir, o comportamento elástico (esforço axial) entre os períodos $\bar{T}$=0.12s e 0.17s.

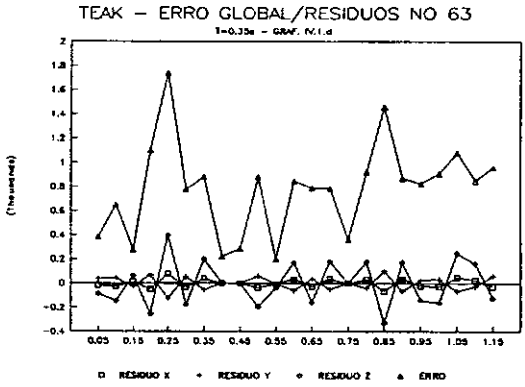


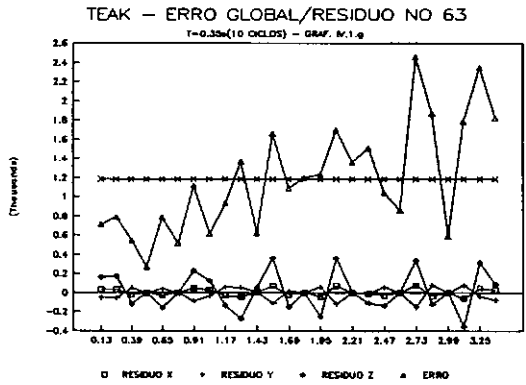


Para os mesmos períodos de excitação e esforço acima descritos, a evolução para o caso 10 ciclos apresenta-se da seguinte forma:









Para $\bar{T}$=0.35s a resposta se apresentou com boa qualidade e a evolução do erro, da análise de 3.5 ciclos para a de 10 ciclos, foi pequena, com os Erros Médios apresentando valores próximos. Todos os deslocamentos e esforços, que foram comparados com a resposta do método de integração direta, não apresentaram diferenças significativas (ver GRÁFICOS IV.8).

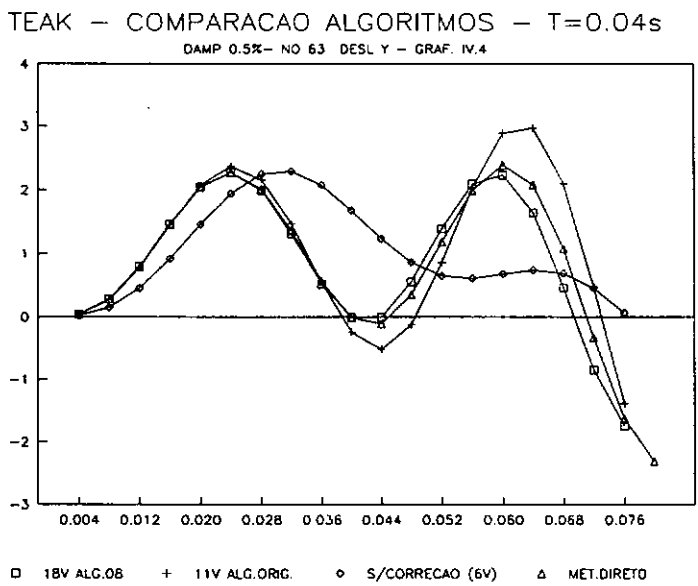
Para $\bar{T}$>0.35s nada de anormal foi constatado.

Para o estudo da eficiência de cada algoritmo de geração de vetores para uma base, foram elaborados os GRÁFICOS IV.2 para auxílio na definição do algoritmo mais eficiente, além

da utilização dos parâmetros de erro (Erro Médio, Desvio do Erro e Máximo Resíduo).

Com a finalidade de setorizar mais as observações acima citadas, os GRÁFICOS IV.3 comparam a solução obtida pelo método de integração direta com o Algoritmo 08 (15 e 18 modos) (ALGORITMO II.2).

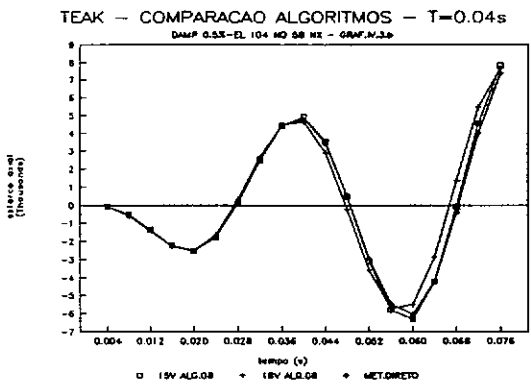
Embora os valores de Erro Médio e Desvio para $\bar{T}$=0.04s, no caso "Sem correção" (Critério 1) fossem menores ou iguais aos demais critérios (ver TABELA IV.1), o caso "Sem correção" apresenta deslocamentos em "Y" bastante equivocados (valores inferiores), enquanto o Critério 3 apresenta uma tendência à "pseudo-ressonância", quando comparados à solução pelo método de integração direta. O GRÁFICO IV.4 apresenta essa confrontação entre os Critério 1 e 3 (TABELA II.1) para explicitar o comportamento da resposta para os dois critérios.



Aliás, para $\bar{T}$=0.04s, a evolução do Erro Médio nos mostra que o erro, apesar de sempre elevado, apresentou um valor mais baixo para uma base pobre ("Sem correção"), aumentando conforme o último modo da análise se aproximava do período de excitação e voltando a diminuir em função do enriquecimento

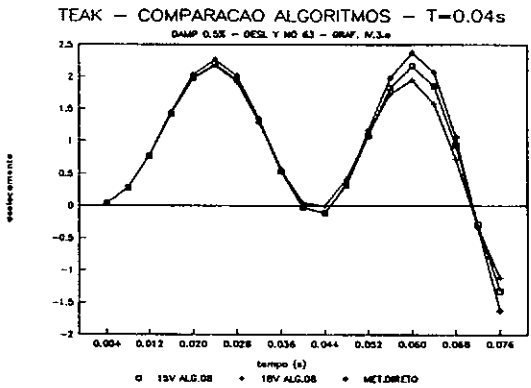
da base. No entanto, apesar da variação dos números desse parâmetro, a indicação no curto intervalo de tempo analisado (2 ciclos), foi de que a qualidade da resposta mostrou-se sempre ruim.

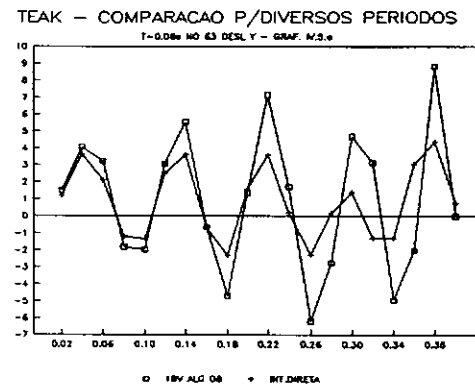
É importante destacar quão enganador pode ser a avaliação de uma resposta por um aspecto isolado da estrutura. O gráfico a seguir apresenta o esforço axial no elemento 104 para $\bar{T}$=0.04s.

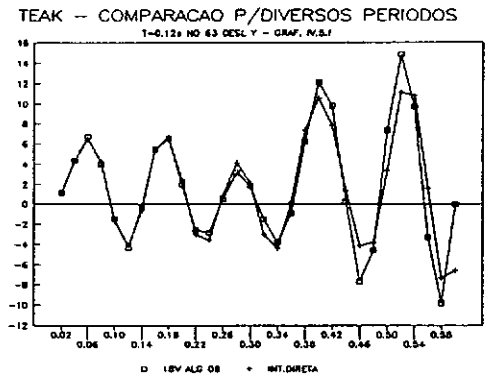


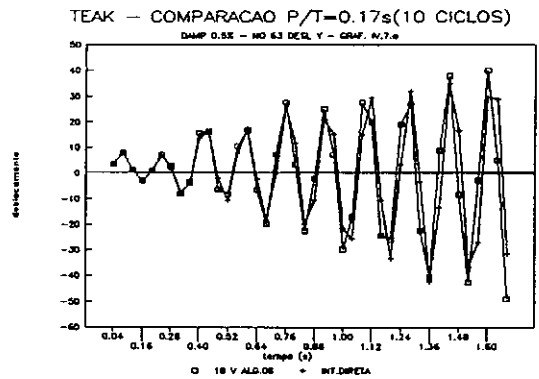
O gráfico apresenta um comportamento bastante razoável, enquanto seria de se esperar uma maior divergência entre os resultados, conforme indicado pelos parâmetros de erro.

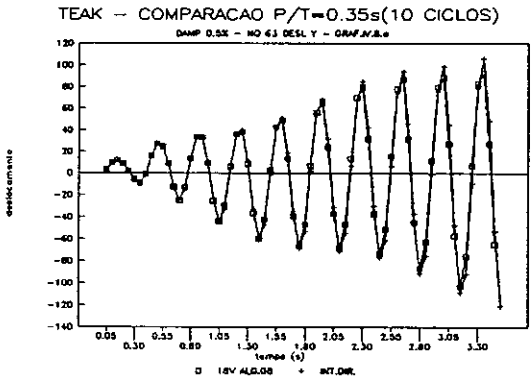
Uma característica já apresentada no Capítulo 3 também se apresentou para esse modelo: os deslocamentos na direção do carregamento (no caso direção "Y" global) têm boa representação para os $\bar{T} \geq 0.12$s. Os gráficos abaixo apresentam a evolução do deslocamento em "Y" para os diversos períodos de excitação.











Os casos de "pseudo-ressonância" apareceram para os casos de $\bar{T}$=0.08s "Com correção", $\bar{T}$=0.12s "Sem correção" e $\bar{T}$=0.17s "Com correção", como constata-se nas TABELAS IV.1 e IV.2, onde observa-se a coincidência entre o último e/ou penúltimo modo obtido na análise e o período de excitação.

Para $\bar{T}$=0.08s, a verificação foi feita em cima de 5 ciclos e também apresentou uma indicação de erro de baixa qualidade na resposta. Observando os gráficos com deslocamentos e esforços, notamos a degeneração na resposta aumentando a cada ciclo.

Para alcançar os períodos modais mais baixos possíveis, notou-se o desmembramento dos modos intermediários, o que, aparentemente, provoca um efeito positivo ao excitar-se a estrutura nos períodos inferiores ao período natural da

estrutura, uma vez que não ocorreram "pseudo-ressonâncias" bem caracterizadas como as que ocorreram nos casos "Com correção" e "Sem correção".

PLATAFORMA TEAK - DAMP 0.5%

CARGA NA DIRECAO 2 ("Y" GLOBAL)
AMPLITUDE MAXIMA DE TODAS AS CARGAS = 30000.

DESCRICAO	MODOS	PERIODO	ERRO MEDIO	DESVIO	MAX.RESID.	NO	t(s)	DIR.	CICLOS
S/CORR	6	T=2.00s	-	-	535	75	0.50	Z	
S/CORR	6	T=0.35s	12418.81	10868.73	12600	75	1.10	Z	3
C/CORR	7	T=0.35s	3693.79	2910.00	-5440	75	1.00	Z	3
ALG.08	18	T=0.35s	784.50	380.70	-607	71	0.85	Z	3
ALG.08	18	T=0.35s	1184.92	577.32	1070	75	3.25	Z	10
S/CORR	6	T=0.17s	10805.31	10122.78	10600	75	0.64	Z	5
C/CORR	7	T=0.17s	23591.78	16547.04	-24100	75	0.60	Z	5
ALG.08	18	T=0.17s	2224.10	2099.70	2580	71	0.72	Z	5
ALG.08	18	T=0.17s	7441.15	6850.86	-8060	71	1.62	Z	10
S/CORR	6	T=0.12s	51256.56	34723.76	-46300	75	0.54	Z	5
C/CORR	7	T=0.12s	15393.74	10309.94	17500	75	0.14	Z	5
ALG.08	18	T=0.12s	5142.70	3971.90	4030	71	0.30	Z	5
ALG.08	18	T=0.12s	7821.00	5137.00	-5550	71	0.75	Z	10
S/CORR	6	T=0.082s	12128.27	7948.88	9040	75	0.10	Z	5
C/CORR	7	T=0.082s	64481.08	41682.35	59100	75	0.38	Z	5
C/CORR(HP)	11	T=0.082s	5525.52	3365.31	-3800	68	0.22	Y	5
ALG.08	18	T=0.082s	8082.90	5750.97	6610	71	0.30	Z	5
S/CORR	6	T=0.04s	5704.05	3168.42	-4000	75	0.03	Z	2
C/CORR(HP)	11	T=0.04s	9174.04	6965.50	7790	68	0.07	Y	2
ALG.10 MOD	15	T=0.04s	10784.91	5698.20	8550	71	0.06	Y	2
ALG.10	15	T=0.04s	11985.36	8619.44	13900	71	0.07	Z	2
ALG.08	15	T=0.04s	5637.91	5108.57	6130	75	0.08	Z	2
ALG.08	18	T=0.04s	6608.71	6885.25	-7690	71	0.08	Z	2

CRITERIOS DE PARADA:

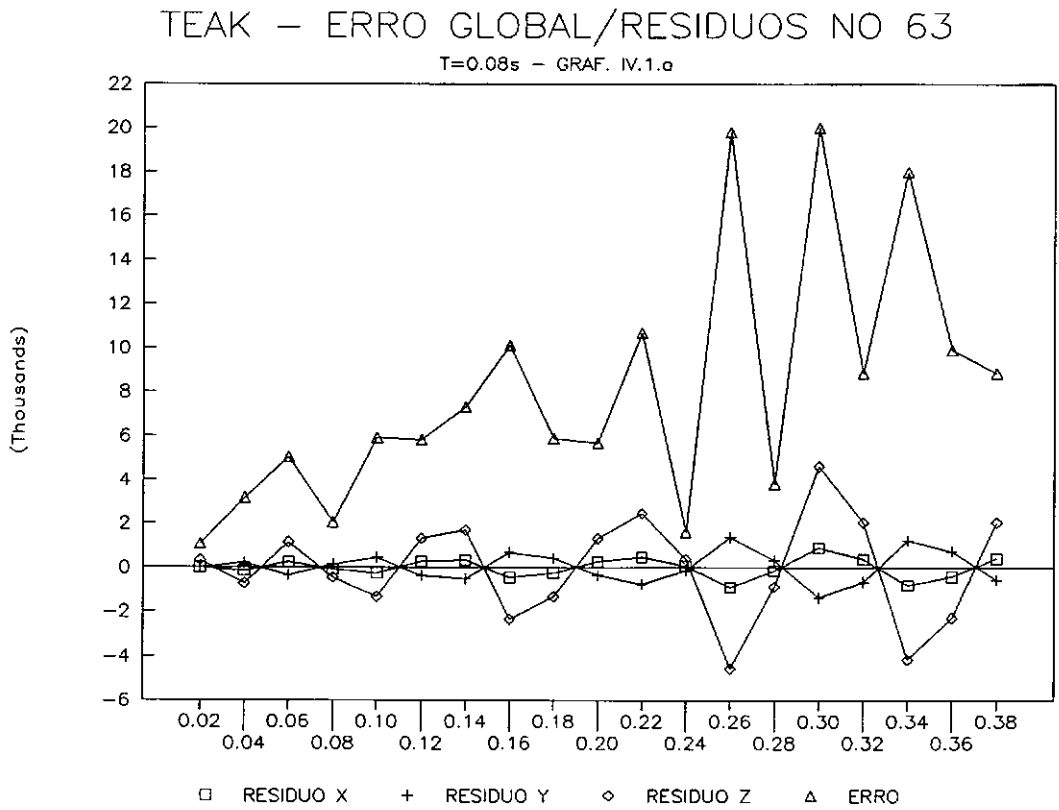
S/COOR	- CRITERIO 1
C/CORR	- CRITERIO 2b
C/CORR(HP)	- CRITERIO 3
ALG.10 MOD	(*)
ALG.10	- CRITERIO 4
ALG.08	- CRITERIO 5

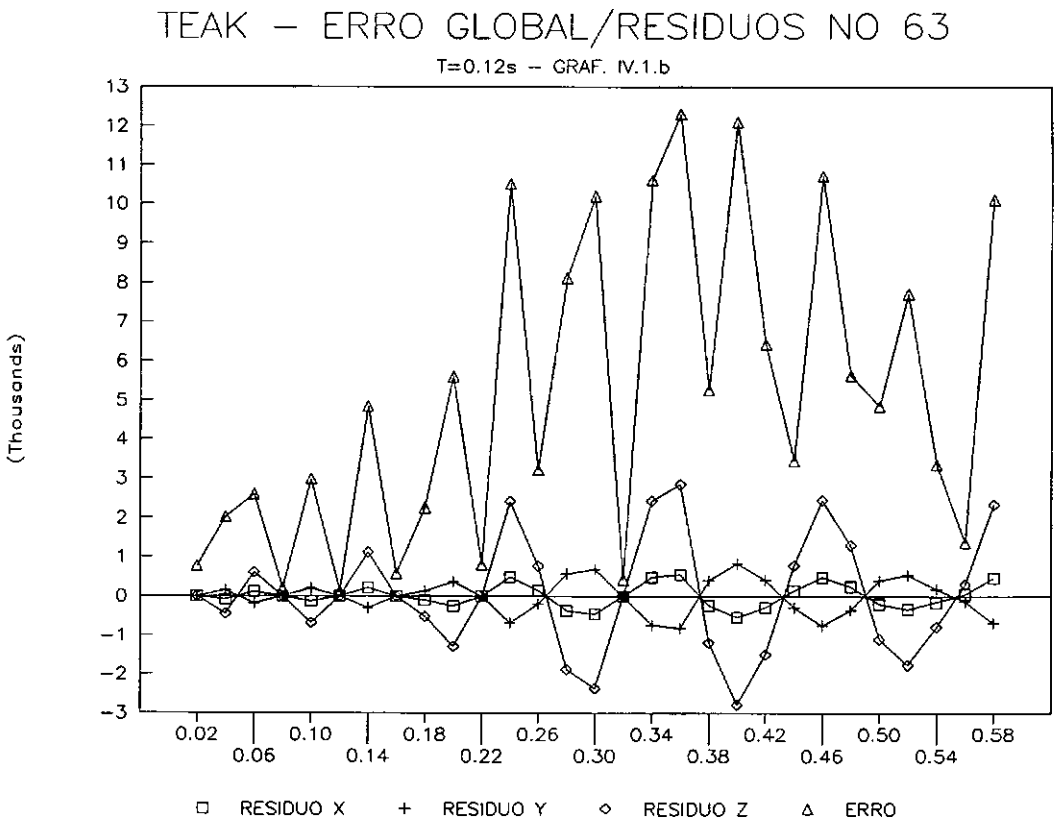
TABELA IV.1

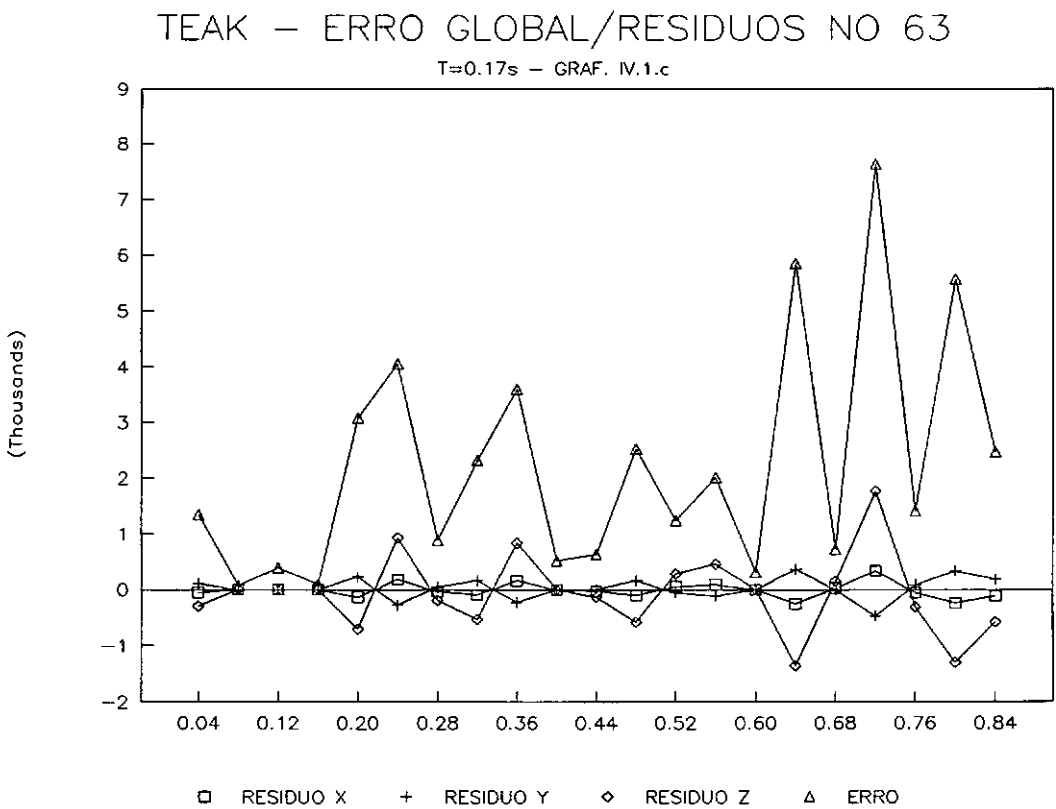
PROCEDIMENTOS AVANÇADOS - TEAK
PERÍODOS(s)

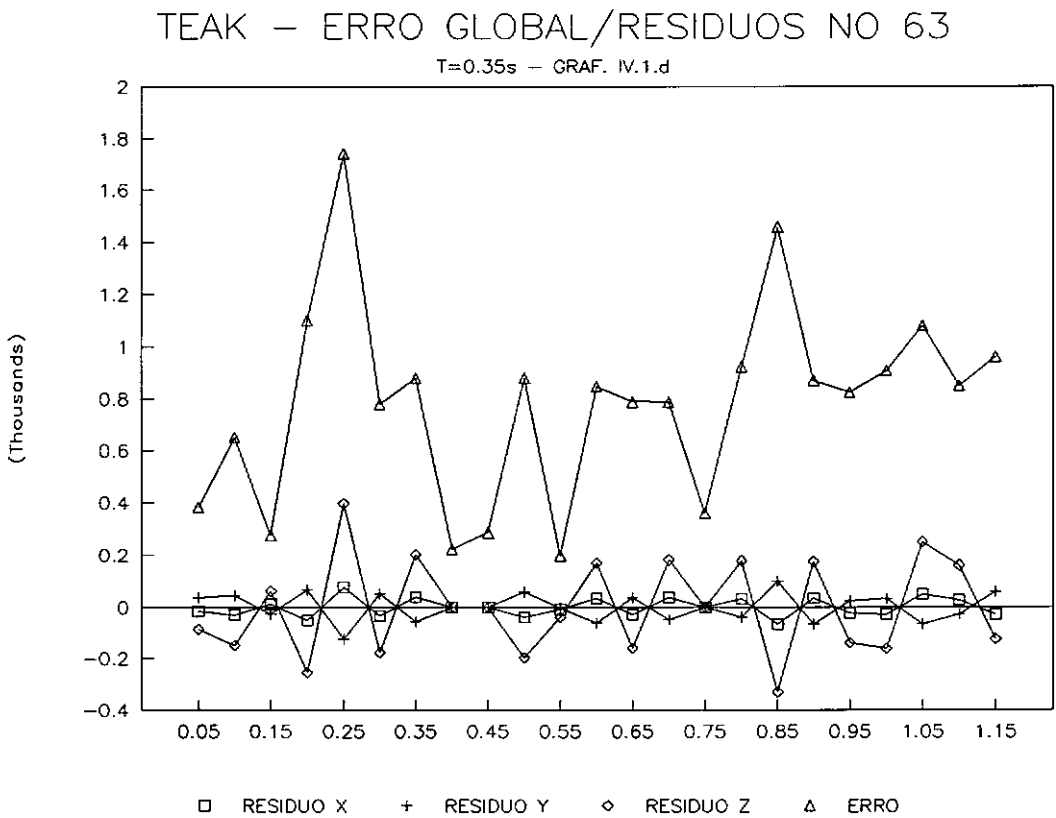
	S/COR. ERRO 10%	C/COR. ERRO 5%	C/COR. (HP)	ALG.10 15 VET.	ALG.08 15 VET.	ALG.08 18 VET.	SESAM
1	1.9360	1.9360	1.9380	1.9340	1.9360	1.9360	2.160
2	1.6667	1.6667	1.6667	1.6667	1.6667	1.6667	1.640
3	1.4710	1.4710	1.4710	1.4710	1.4710	1.4710	1.450
4	0.3605	0.3788	0.3831	0.3831	0.3831	0.3831	0.990
5	0.2914	0.3489	0.3517	0.3518	0.3518	0.3552	0.532
6	0.1206	0.1762	0.3473	0.3485	0.3489	0.3518	0.469
7		0.0817	0.2838	0.3083	0.3317	0.3483	0.440
8			0.2548	0.2838	0.2996	0.3081	0.403
9			0.1665	0.2636	0.2819	0.2846	0.377
10			0.1000	0.2188	0.2564	0.2803	0.341
11			0.0425	0.1940	0.1673	0.2589	0.317
12				0.1664	0.1562	0.2263	0.297
13				0.1055	0.1050	0.1677	0.282
14				0.0762	0.0780	0.1629	0.279
15				0.0388	0.0384	0.1113	0.249
16						0.0915	0.245
17						0.0572	0.238
18						0.0367	0.231
20							0.221
25							0.186
30							0.172
35							0.153
40							0.137
45							0.124
50							0.118
F.P.C.	0.5554	0.6568	0.9537	0.8074	0.9799	0.9842	*
MASS X	0.9483	0.9496	n.d.	0.9799	0.9797	0.9873	*
MASS Y	0.9860	0.9862	n.d.	0.9958	0.9959	0.9961	*
MASS Z	0.8136	0.9130	n.d.	0.9392	0.9391	0.9420	*
Mtotal	0.9272	0.9558	0.9973	0.9707	0.9706	0.9746	*

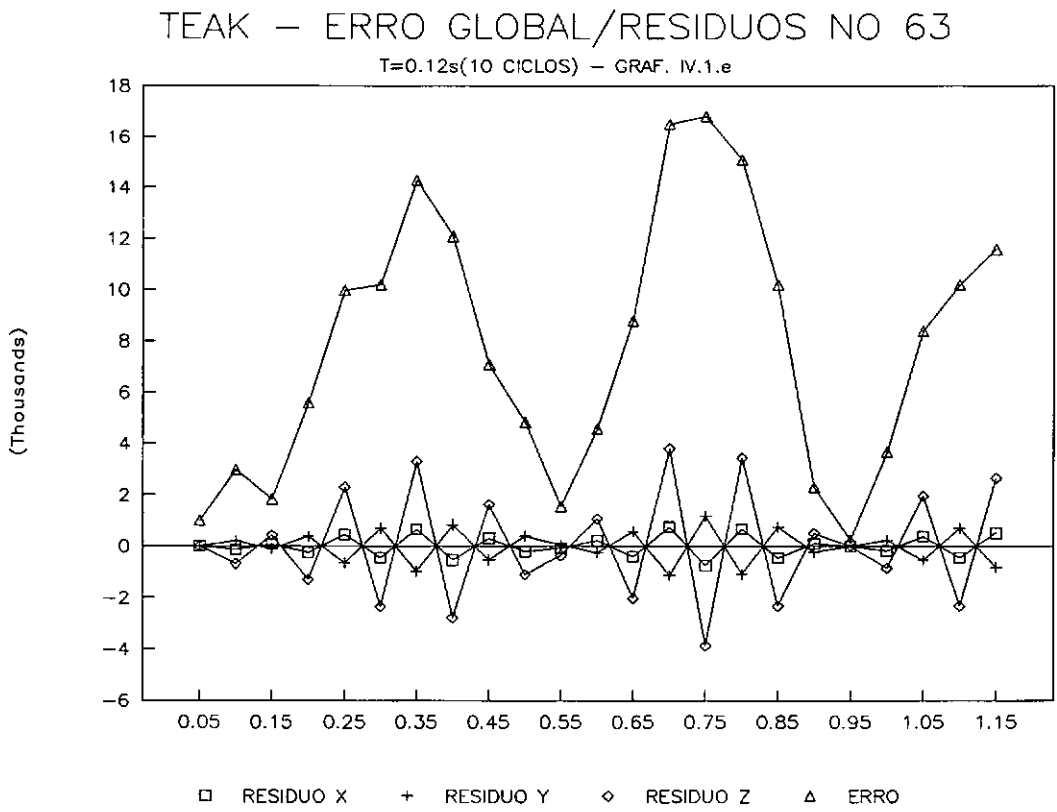
TABELA IV.2

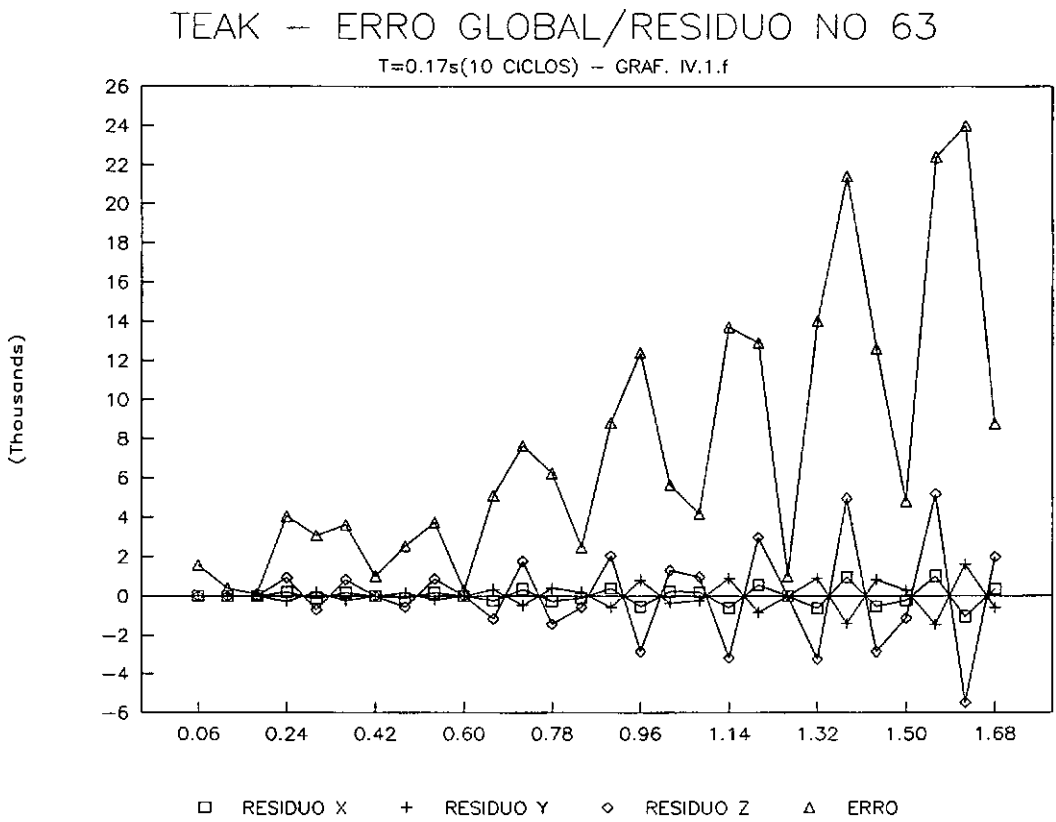

TEAK – ERRO GLOBAL/RESIDUOS NO 63
T=0.08s – GRAF. IV.1.a
(Thousands)
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
−2
−4
−6
0.02 0.04 0.06 0.08 0.10 0.12 0.14 0.16 0.18 0.20 0.22 0.24 0.26 0.28 0.30 0.32 0.34 0.36 0.38
RESIDUO X
RESIDUO Y
RESIDUO Z
ERRO

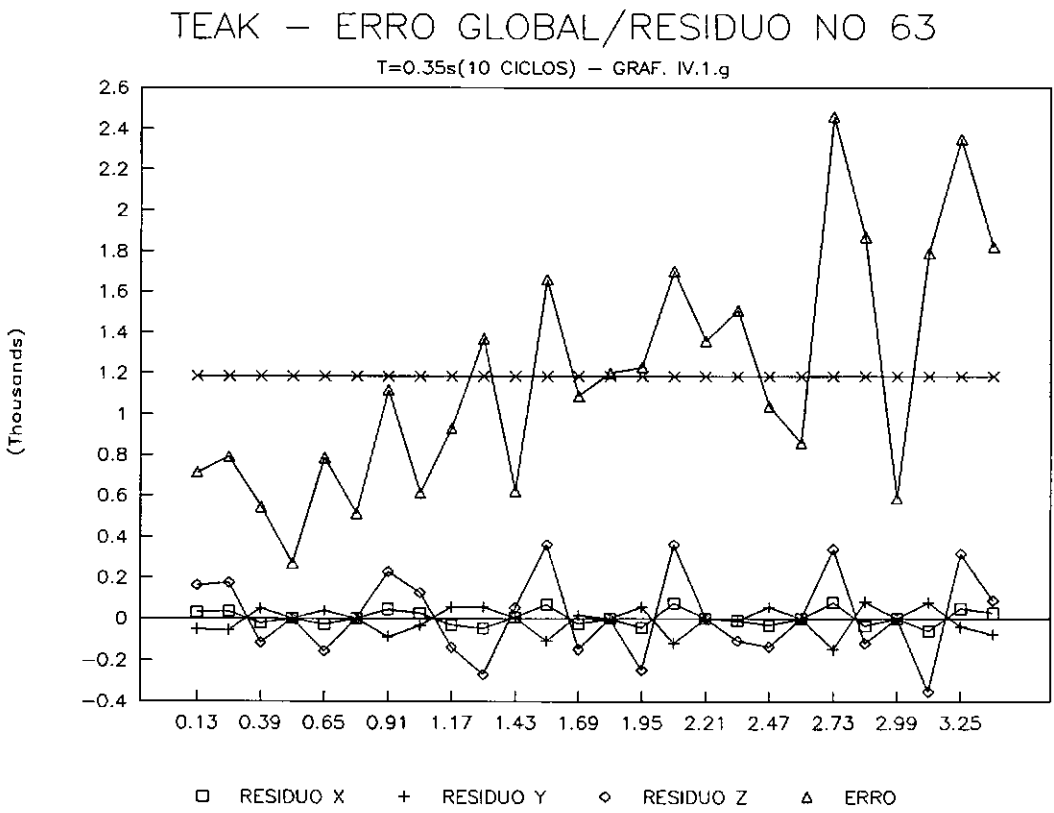

TEAK – ERRO GLOBAL/RESIDUOS NO 63
T=0.12s – GRAF. IV.1.b
(Thousands)
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
−1
−2
−3
0.02 0.06 0.10 0.14 0.18 0.22 0.26 0.30 0.34 0.38 0.42 0.46 0.50 0.54 0.58
RESIDUO X
RESIDUO Y
RESIDUO Z
ERRO

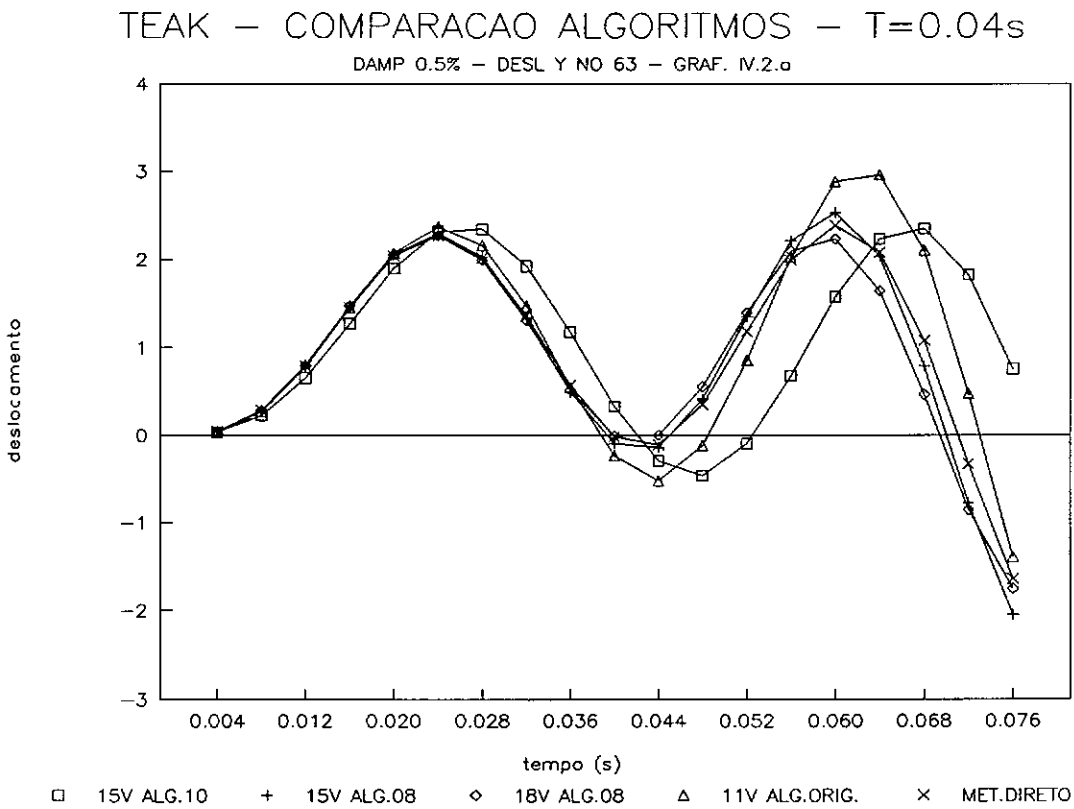

TEAK – ERRO GLOBAL/RESIDUOS NO 63
T=0.17s – GRAF. IV.1.c
(Thousands)
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
−1
−2
0.04
0.12
0.20
0.28
0.36
0.44
0.52
0.60
0.68
0.76
0.84
RESIDUO X
RESIDUO Y
RESIDUO Z
ERRO

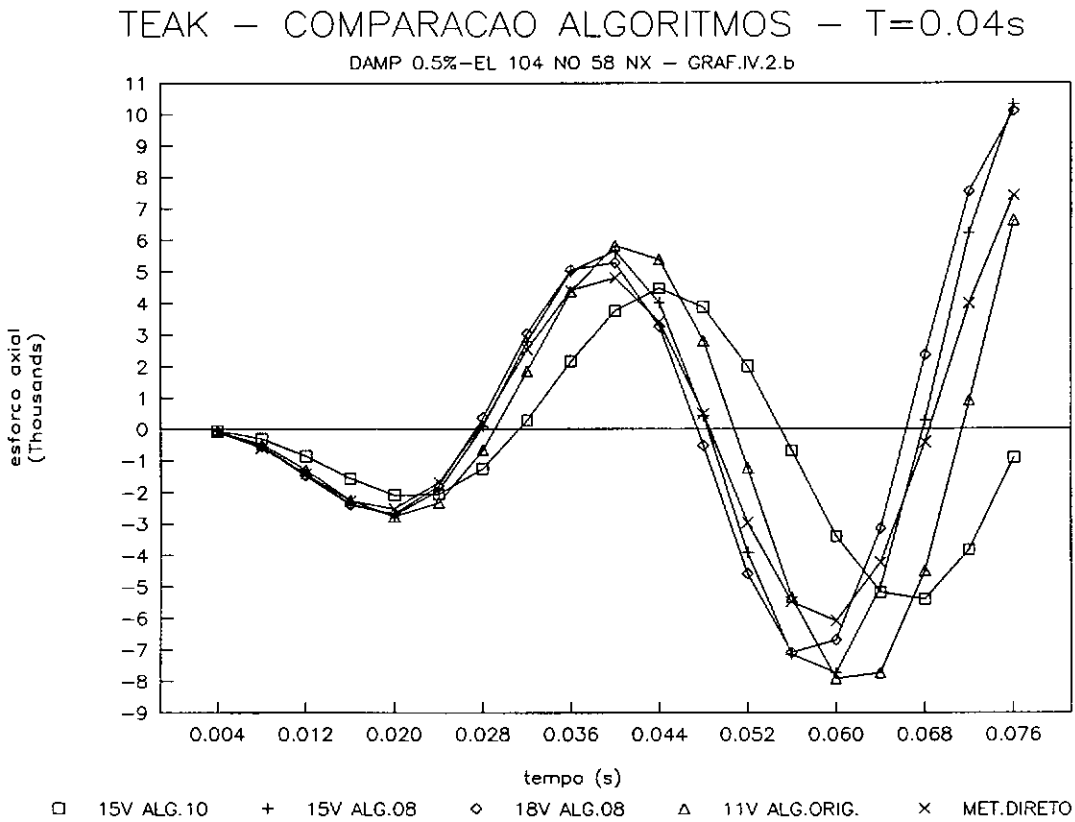

TEAK – ERRO GLOBAL/RESIDUOS NO 63
T=0.35s – GRAF. IV.1.d
(Thousands)
2
1.8
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
−0.2
−0.4
0.05
0.15
0.25
0.35
0.45
0.55
0.65
0.75
0.85
0.95
1.05
1.15
RESIDUO X
RESIDUO Y
RESIDUO Z
ERRO

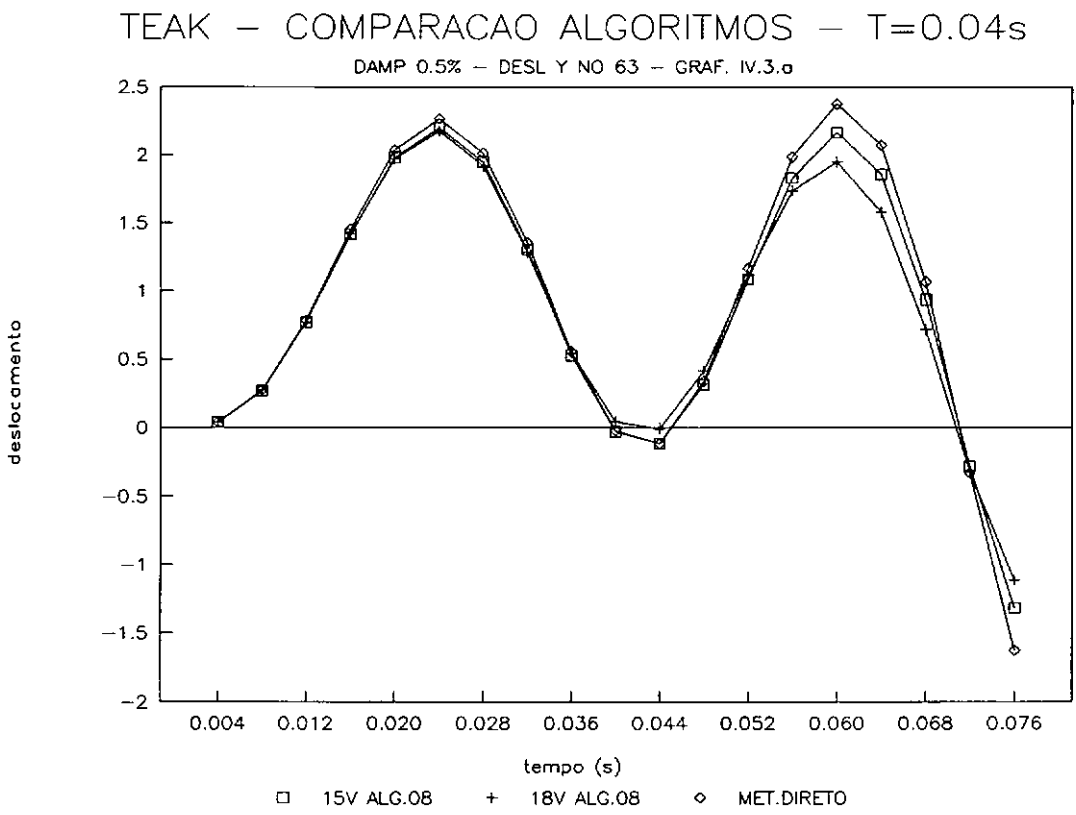

TEAK – ERRO GLOBAL/RESIDUOS NO 63
T=0.12s(10 CICLOS) – GRAF. IV.1.e
(Thousands)
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
−2
−4
−6
0.05
0.15
0.25
0.35
0.45
0.55
0.65
0.75
0.85
0.95
1.05
1.15
RESIDUO X
RESIDUO Y
RESIDUO Z
ERRO

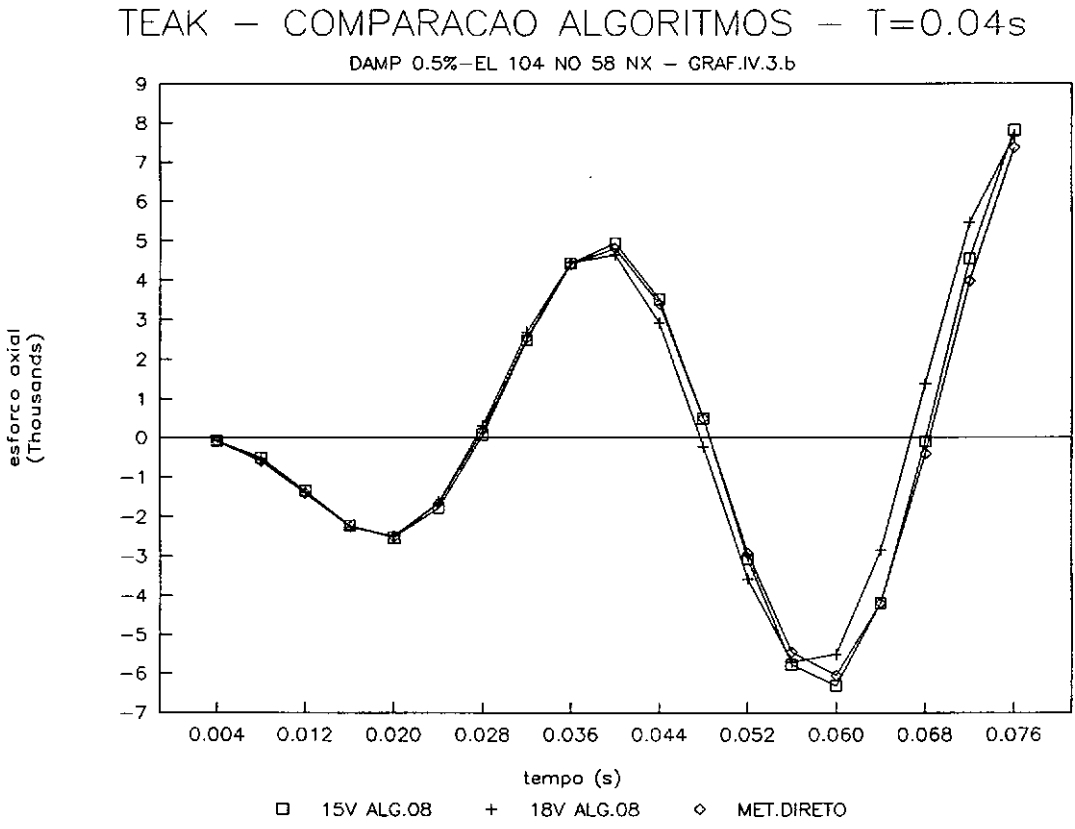

TEAK – ERRO GLOBAL/RESIDUO NO 63
T=0.17s(10 CICLOS) – GRAF. IV.1.f
(Thousands)
26
24
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
−2
−4
−6
0.06
0.24
0.42
0.60
0.78
0.96
1.14
1.32
1.50
1.68
RESIDUO X
RESIDUO Y
RESIDUO Z
ERRO

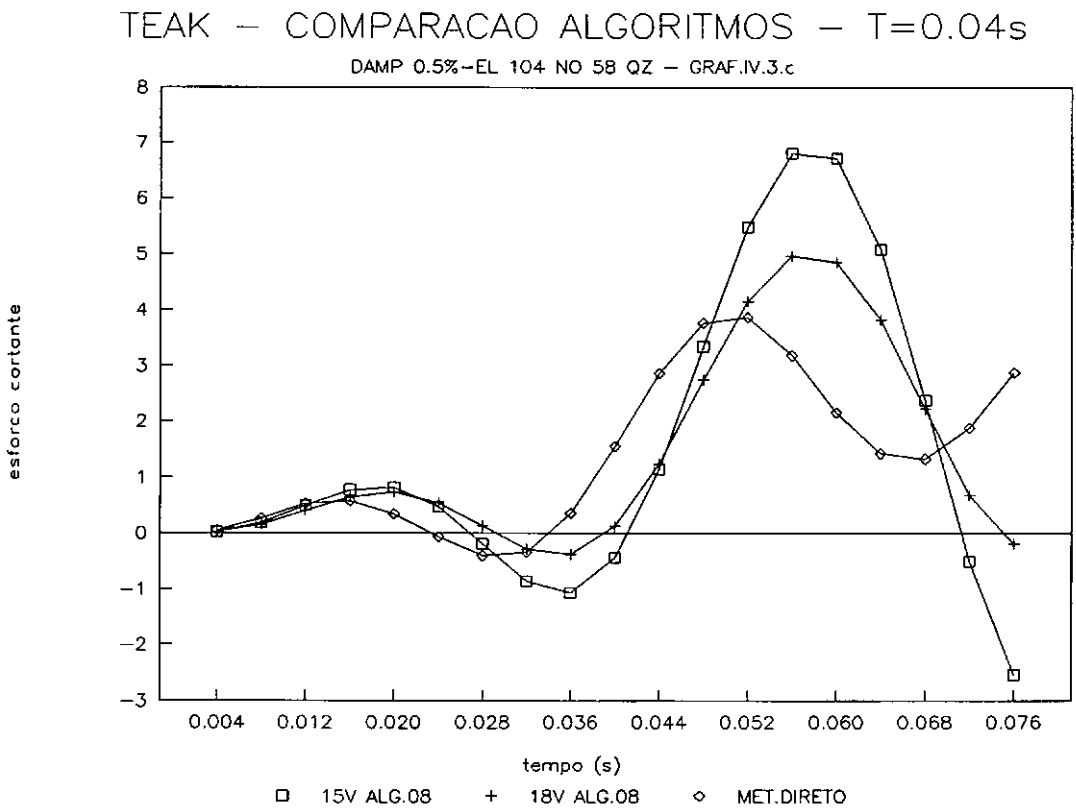

TEAK – ERRO GLOBAL/RESIDUO NO 63
T=0.35s(10 CICLOS) – GRAF. IV.1.g
(Thousands)
2.6
2.4
2.2
2
1.8
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
−0.2
−0.4
0.13 0.39 0.65 0.91 1.17 1.43 1.69 1.95 2.21 2.47 2.73 2.99 3.25
RESIDUO X
RESIDUO Y
RESIDUO Z
ERRO

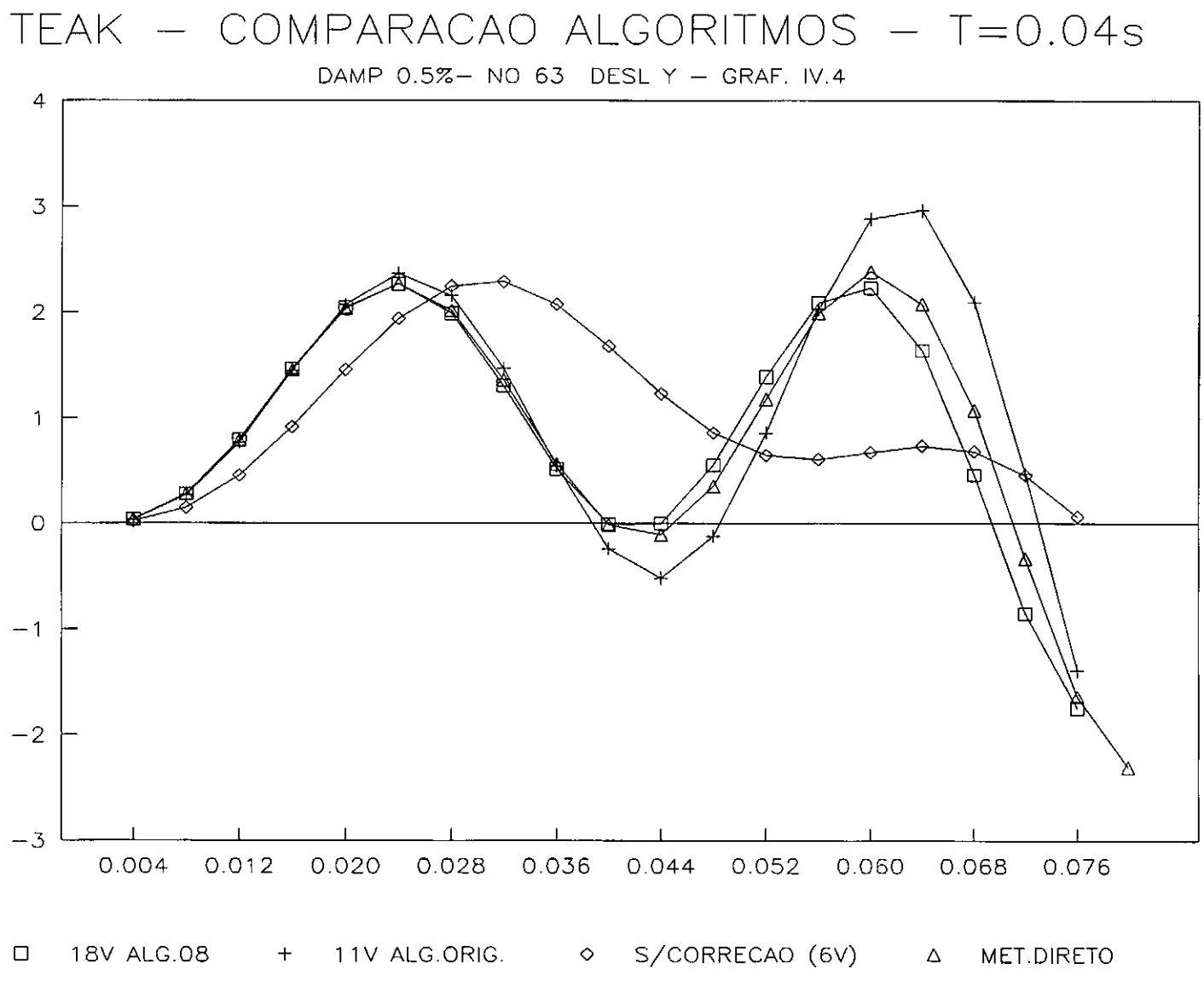

TEAK – COMPARACAO ALGORITMOS – T=0.04s
DAMP 0.5% – DESL Y NO 63 – GRAF. IV.2.a
deslocamento
tempo (s)
15V ALG.10
15V ALG.08
18V ALG.08
11V ALG.ORIG.
MET.DIRETO


TEAK – COMPARACAO ALGORITMOS – T=0.04s
DAMP 0.5%–EL 104 NO 58 NX – GRAF.IV.2.b
esforco axial (Thousands)
tempo (s)
15V ALG.10
15V ALG.08
18V ALG.08
11V ALG.ORIG.
MET.DIRETO


TEAK – COMPARACAO ALGORITMOS – T=0.04s
DAMP 0.5% – DESL Y NO 63 – GRAF. IV.3.a
deslocamento
2.5
2
1.5
1
0.5
0
−0.5
−1
−1.5
−2
0.004
0.012
0.020
0.028
0.036
0.044
0.052
0.060
0.068
0.076
tempo (s)
15V ALG.08
18V ALG.08
MET.DIRETO

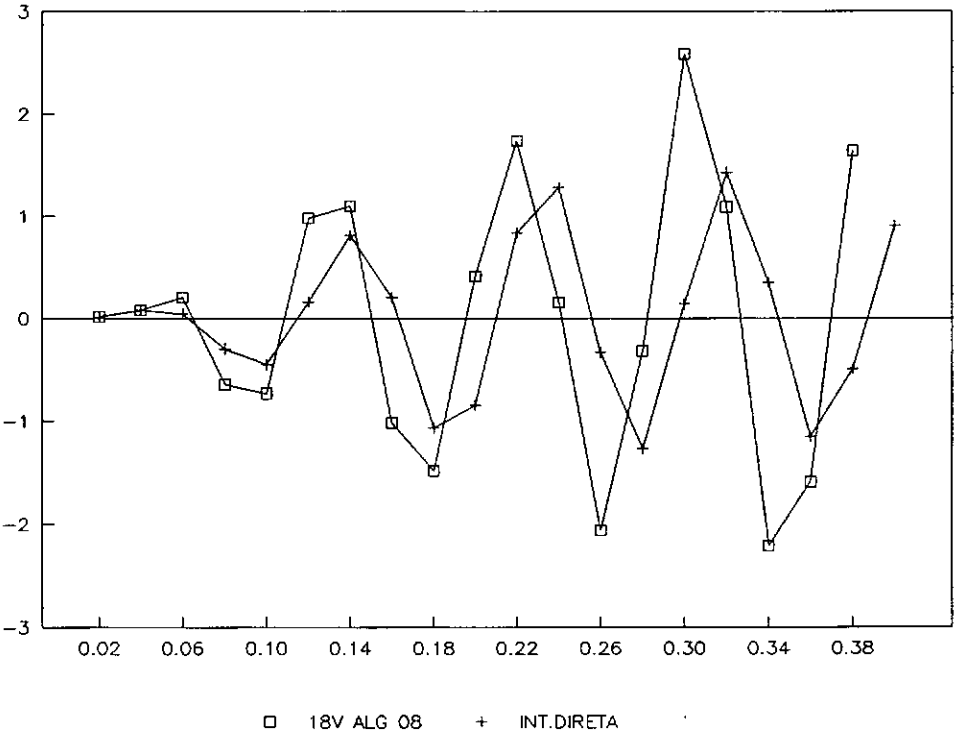

TEAK – COMPARACAO ALGORITMOS – T=0.04s
DAMP 0.5%–EL 104 NO 58 NX – GRAF.IV.3.b
esforco axial (Thousands)
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
−1
−2
−3
−4
−5
−6
−7
0.004
0.012
0.020
0.028
0.036
0.044
0.052
0.060
0.068
0.076
tempo (s)
15V ALG.08
18V ALG.08
MET.DIRETO


TEAK – COMPARACAO ALGORITMOS – T=0.04s
DAMP 0.5%–EL 104 NO 58 QZ – GRAF.IV.3.c
esforco cortante
8
7
6
5
4
3
2
1
0
−1
−2
−3
0.004
0.012
0.020
0.028
0.036
0.044
0.052
0.060
0.068
0.076
tempo (s)
15V ALG.08
18V ALG.08
MET.DIRETO


TEAK – COMPARACAO ALGORITMOS – T=0.04s
DAMP 0.5%– NO 63 DESL Y – GRAF. IV.4
4
3
2
1
0
−1
−2
−3
0.004
0.012
0.020
0.028
0.036
0.044
0.052
0.060
0.068
0.076
□ 18V ALG.08
+ 11V ALG.ORIG.
◇ S/CORRECAO (6V)
△ MET.DIRETO

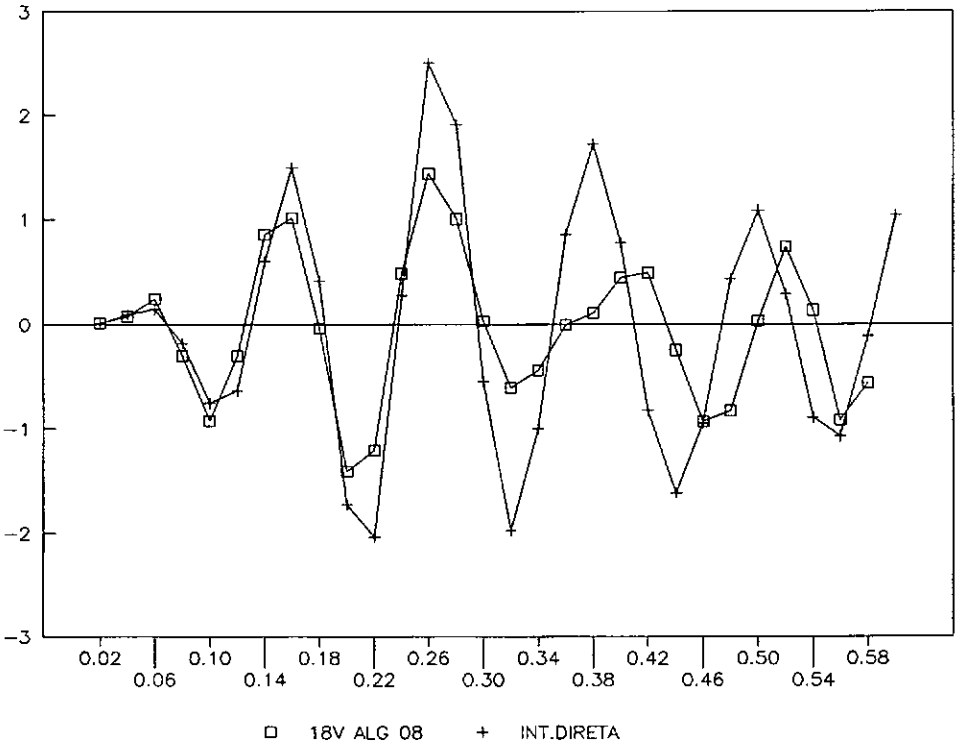
TEAK – COMPARACAO P/DIVERSOS PERIODOS

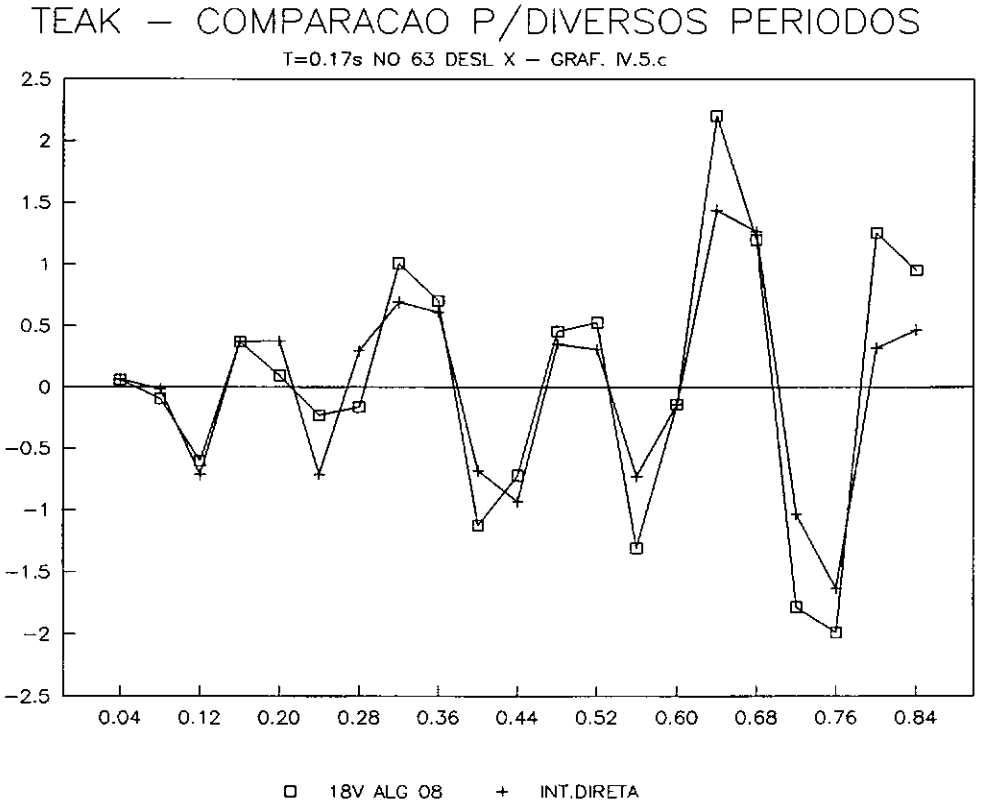
T=0.08s NO 63 DESL X – GRAF. IV.5.a

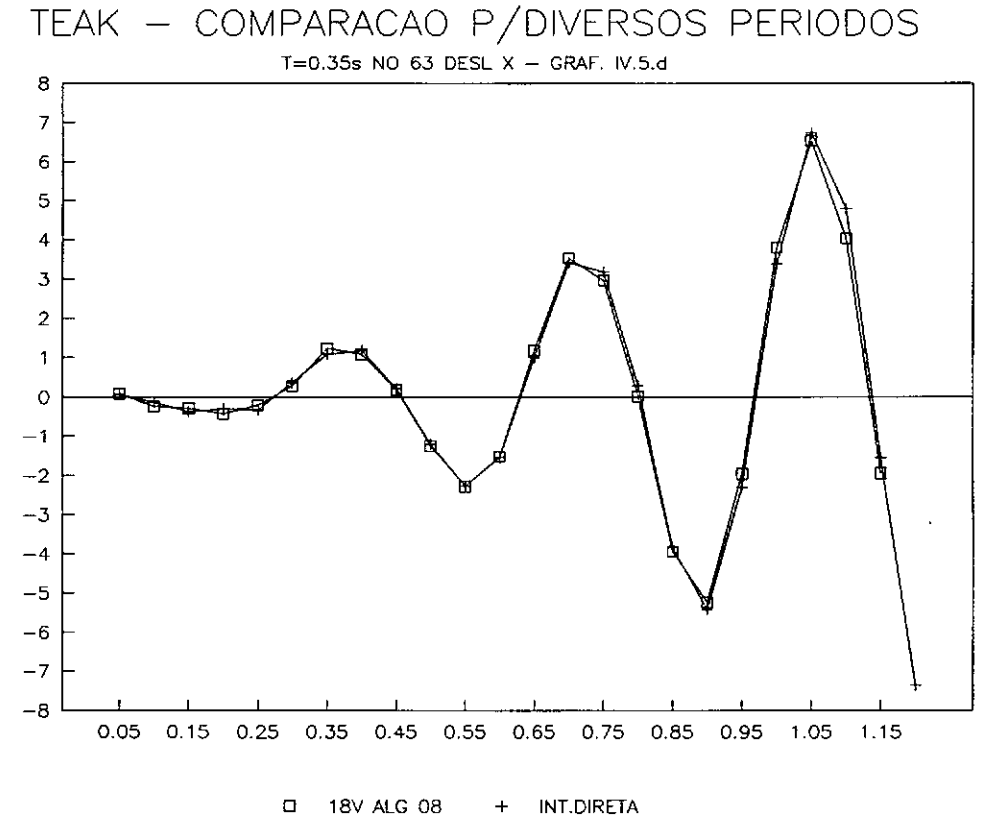


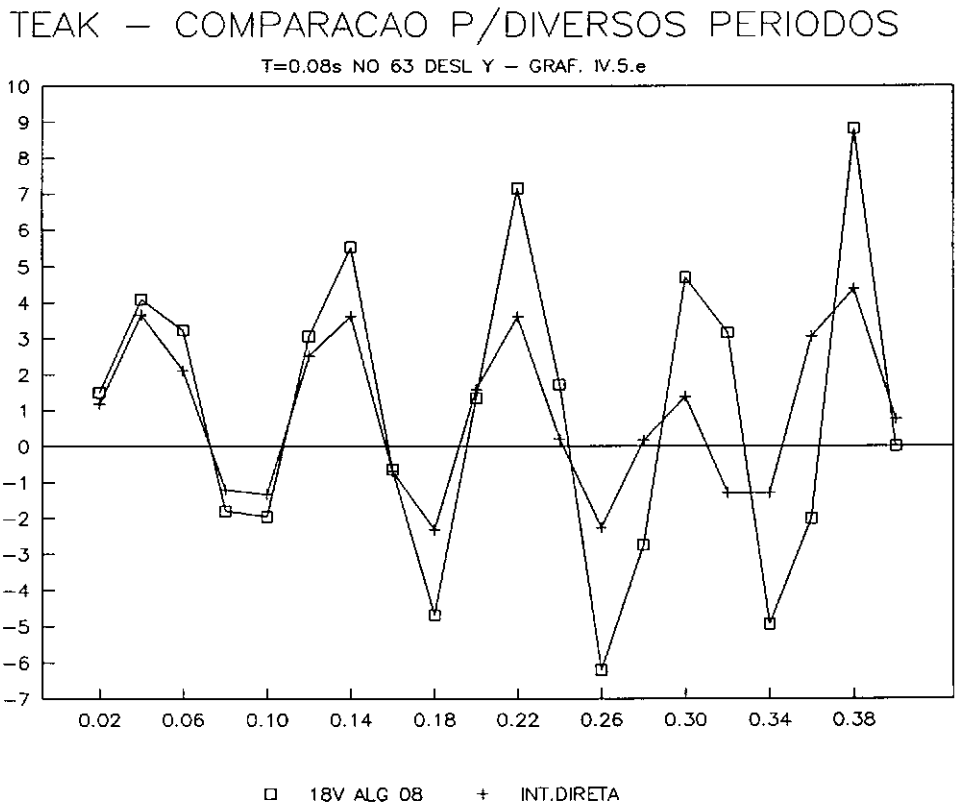
TEAK – COMPARACAO P/DIVERSOS PERIODOS

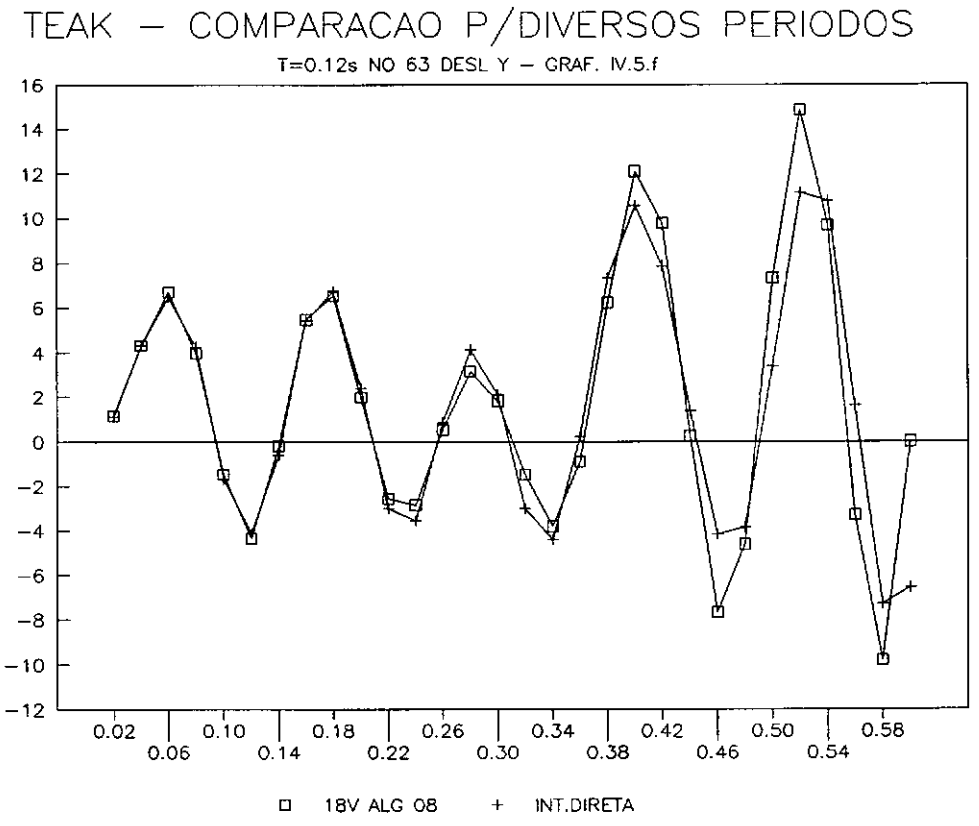
T=0.12s NO 63 DESL X – GRAF. IV.5.b

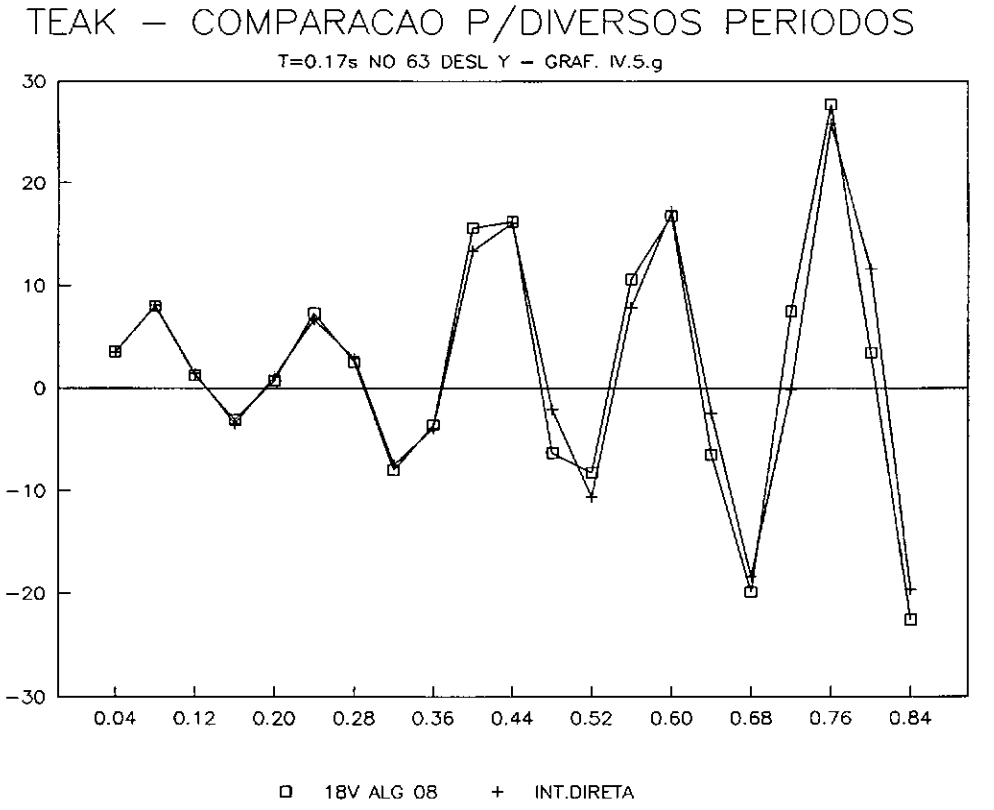


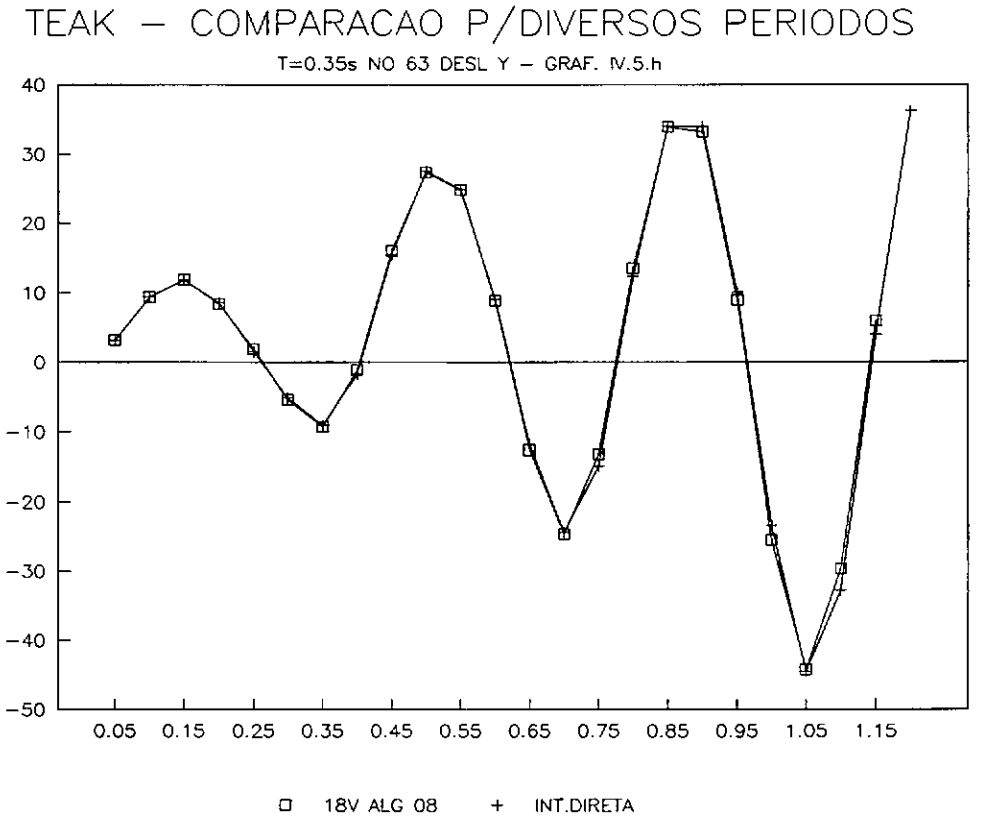

TEAK – COMPARACAO P/DIVERSOS PERIODOS
T=0.17s NO 63 DESL X – GRAF. IV.5.c
2.5
2
1.5
1
0.5
0
−0.5
−1
−1.5
−2
−2.5
0.04
0.12
0.20
0.28
0.36
0.44
0.52
0.60
0.68
0.76
0.84
18V ALG 08
+ INT.DIRETA

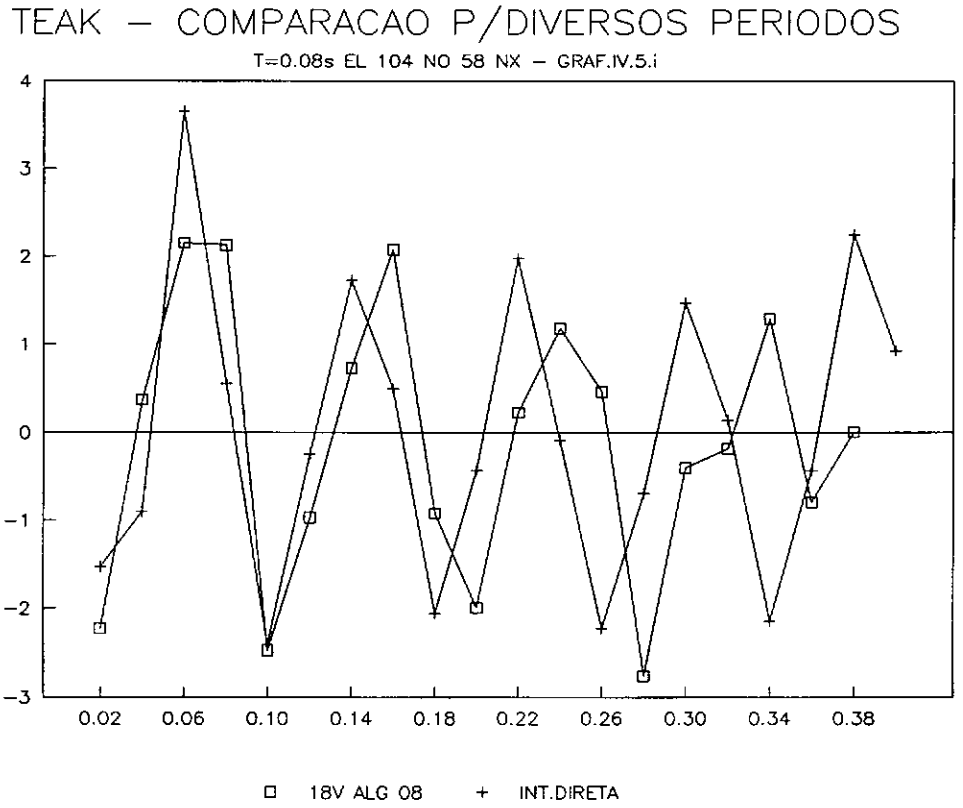

TEAK – COMPARACAO P/DIVERSOS PERIODOS
T=0.35s NO 63 DESL X – GRAF. IV.5.d
8
7
6
5
4
3
2
1
0
−1
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
0.05
0.15
0.25
0.35
0.45
0.55
0.65
0.75
0.85
0.95
1.05
1.15
18V ALG 08
+ INT.DIRETA

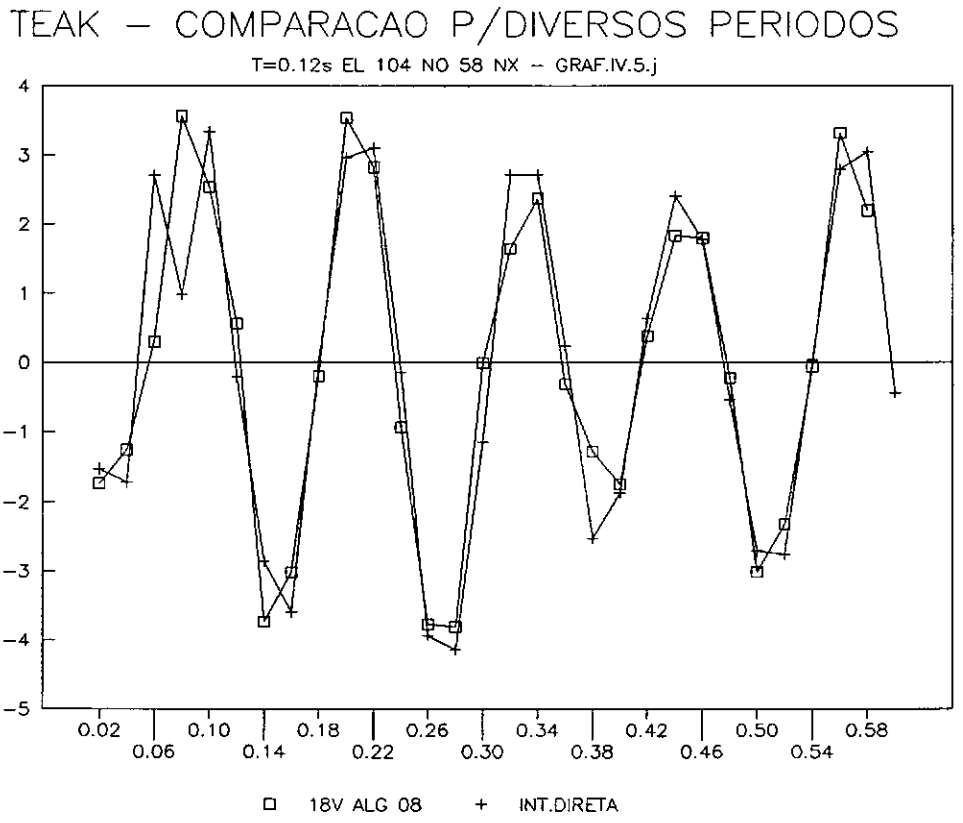

TEAK – COMPARACAO P/DIVERSOS PERIODOS
T=0.08s NO 63 DESL Y – GRAF. IV.5.e
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
−1
−2
−3
−4
−5
−6
−7
0.02
0.06
0.10
0.14
0.18
0.22
0.26
0.30
0.34
0.38
18V ALG 08
+ INT.DIRETA

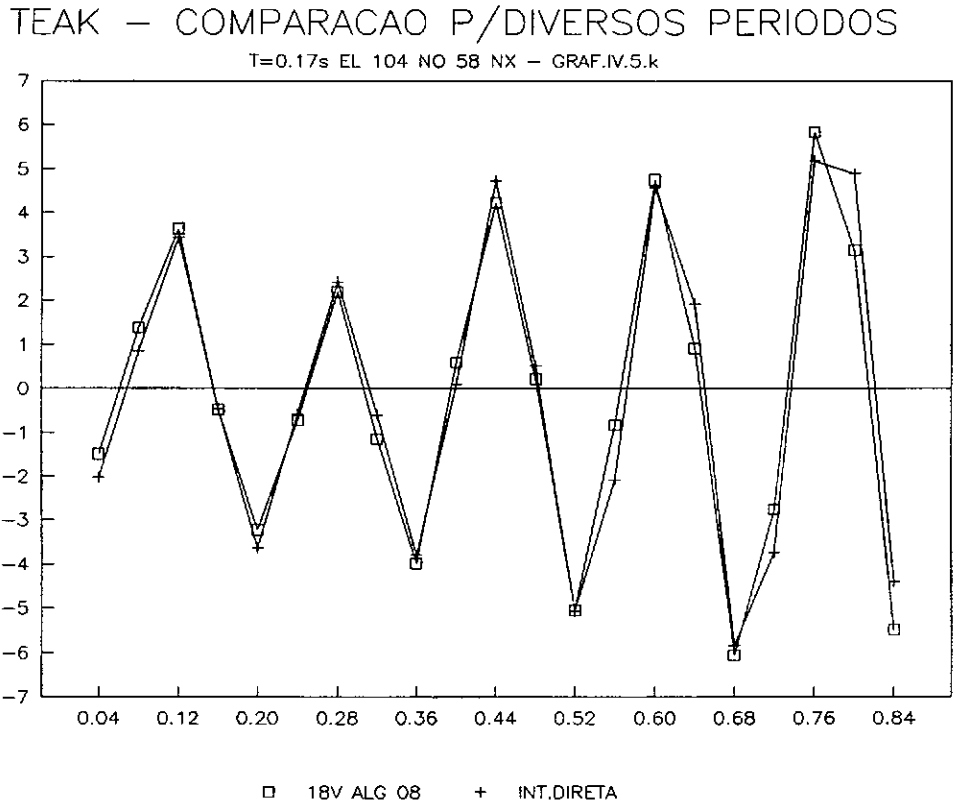

TEAK – COMPARACAO P/DIVERSOS PERIODOS
T=0.12s NO 63 DESL Y – GRAF. IV.5.f
16
14
12
10
8
6
4
2
0
−2
−4
−6
−8
−10
−12
0.02
0.06
0.10
0.14
0.18
0.22
0.26
0.30
0.34
0.38
0.42
0.46
0.50
0.54
0.58
18V ALG 08
+ INT.DIRETA

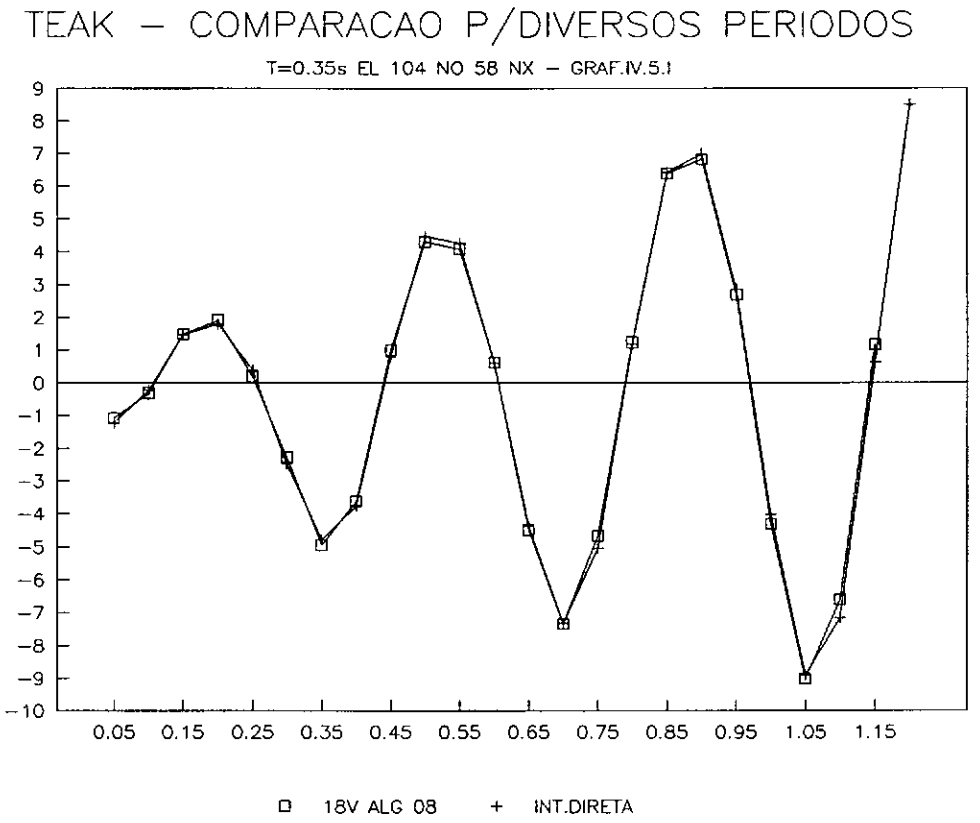

TEAK – COMPARACAO P/DIVERSOS PERIODOS
T=0.17s NO 63 DESL Y – GRAF. IV.5.g
30
20
10
0
−10
−20
−30
0.04
0.12
0.20
0.28
0.36
0.44
0.52
0.60
0.68
0.76
0.84
18V ALG 08
+ INT.DIRETA

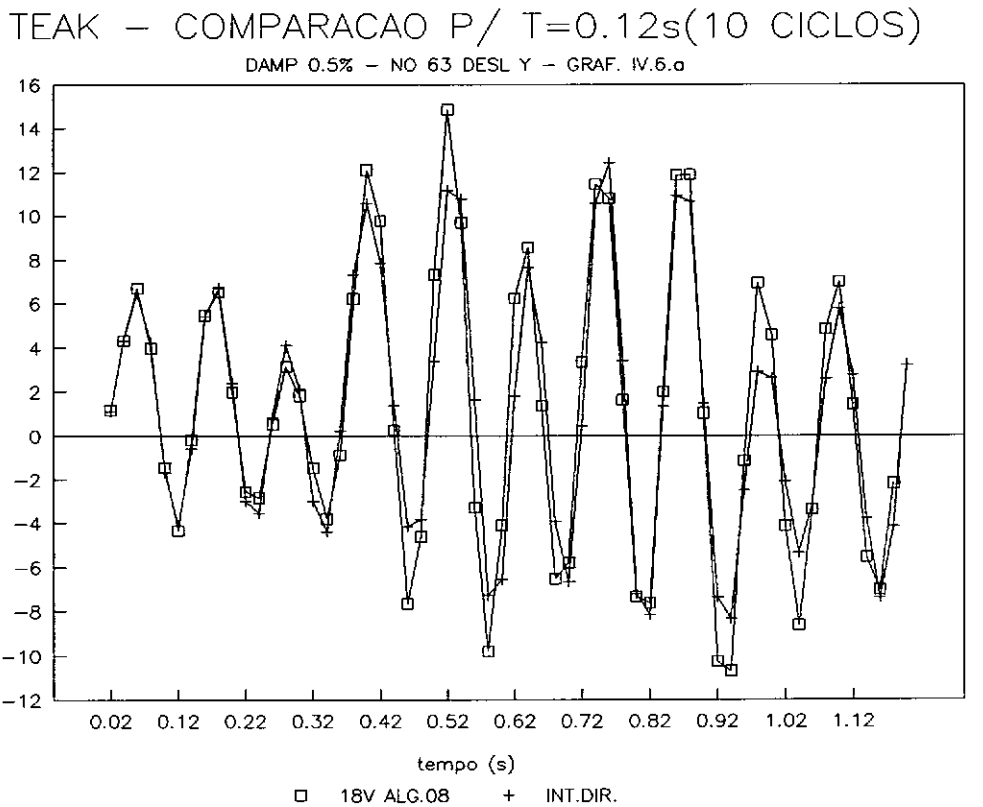

TEAK – COMPARACAO P/DIVERSOS PERIODOS
T=0.35s NO 63 DESL Y – GRAF. IV.5.h
40
30
20
10
0
−10
−20
−30
−40
−50
0.05
0.15
0.25
0.35
0.45
0.55
0.65
0.75
0.85
0.95
1.05
1.15
18V ALG 08
+ INT.DIRETA

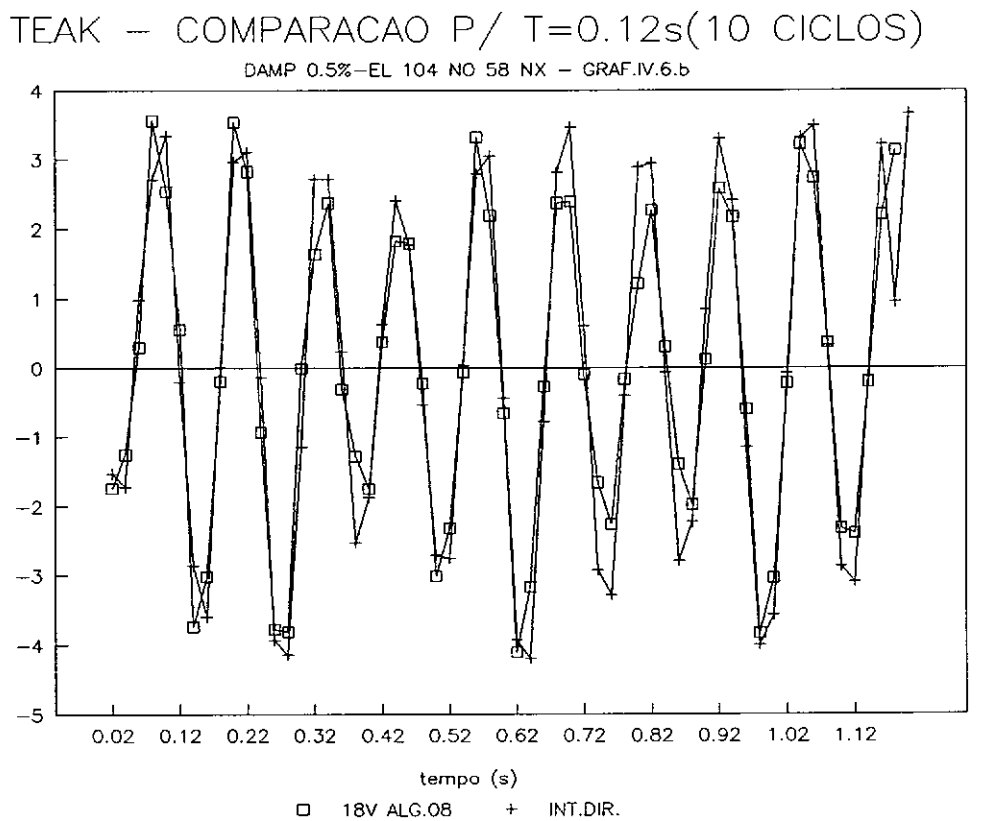

TEAK – COMPARACAO P/DIVERSOS PERIODOS
T=0.08s EL 104 NO 58 NX – GRAF.IV.5.i
4
3
2
1
0
−1
−2
−3
0.02
0.06
0.10
0.14
0.18
0.22
0.26
0.30
0.34
0.38
18V ALG 08
INT.DIRETA

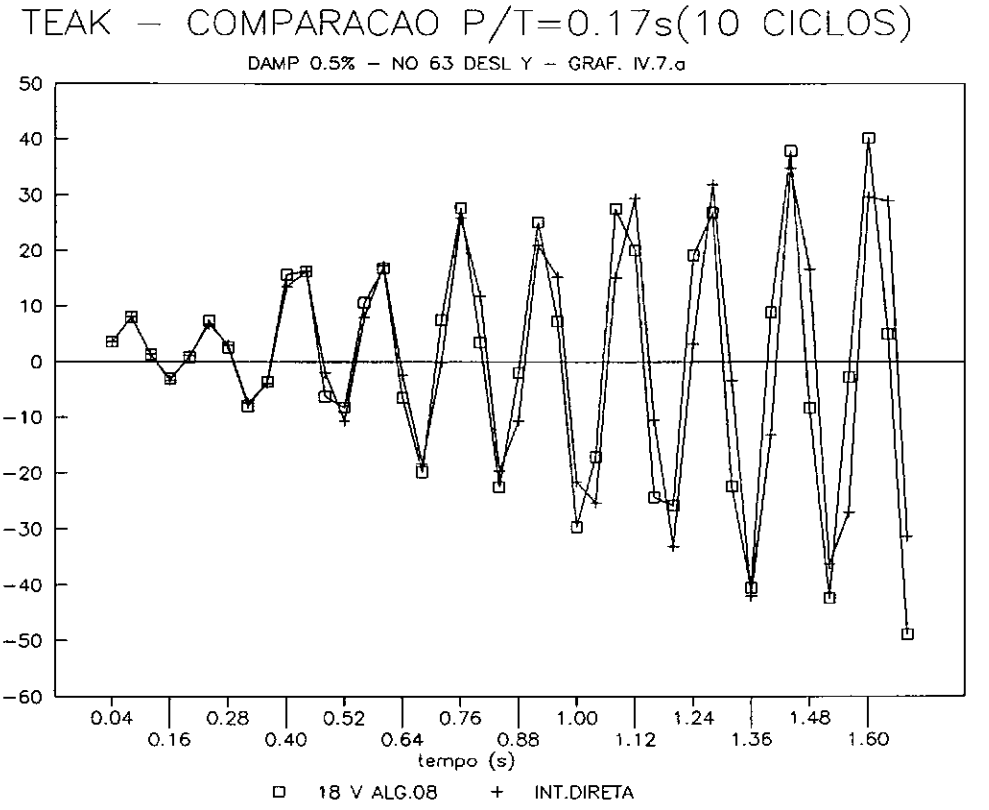

TEAK – COMPARACAO P/DIVERSOS PERIODOS
T=0.12s EL 104 NO 58 NX – GRAF.IV.5.j
4
3
2
1
0
−1
−2
−3
−4
−5
0.02
0.06
0.10
0.14
0.18
0.22
0.26
0.30
0.34
0.38
0.42
0.46
0.50
0.54
0.58
18V ALG 08
INT.DIRETA

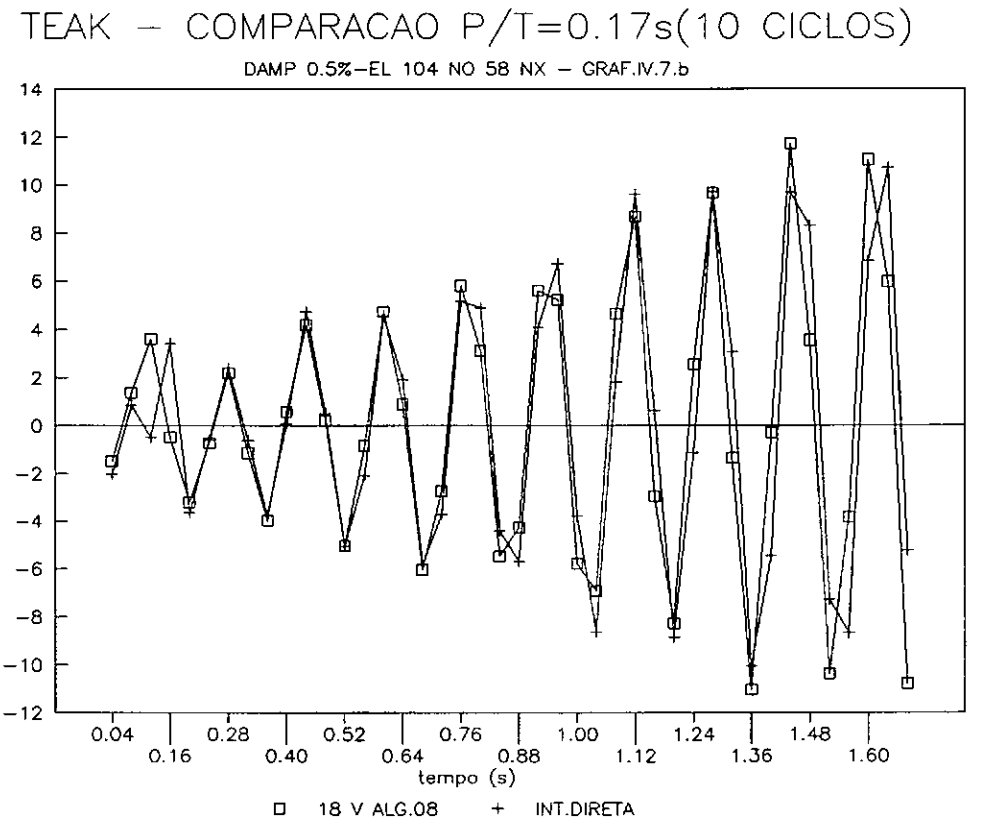

TEAK – COMPARACAO P/DIVERSOS PERIODOS
T=0.17s EL 104 NO 58 NX – GRAF.IV.5.k
7
6
5
4
3
2
1
0
−1
−2
−3
−4
−5
−6
−7
0.04
0.12
0.20
0.28
0.36
0.44
0.52
0.60
0.68
0.76
0.84
18V ALG 08
+ INT.DIRETA

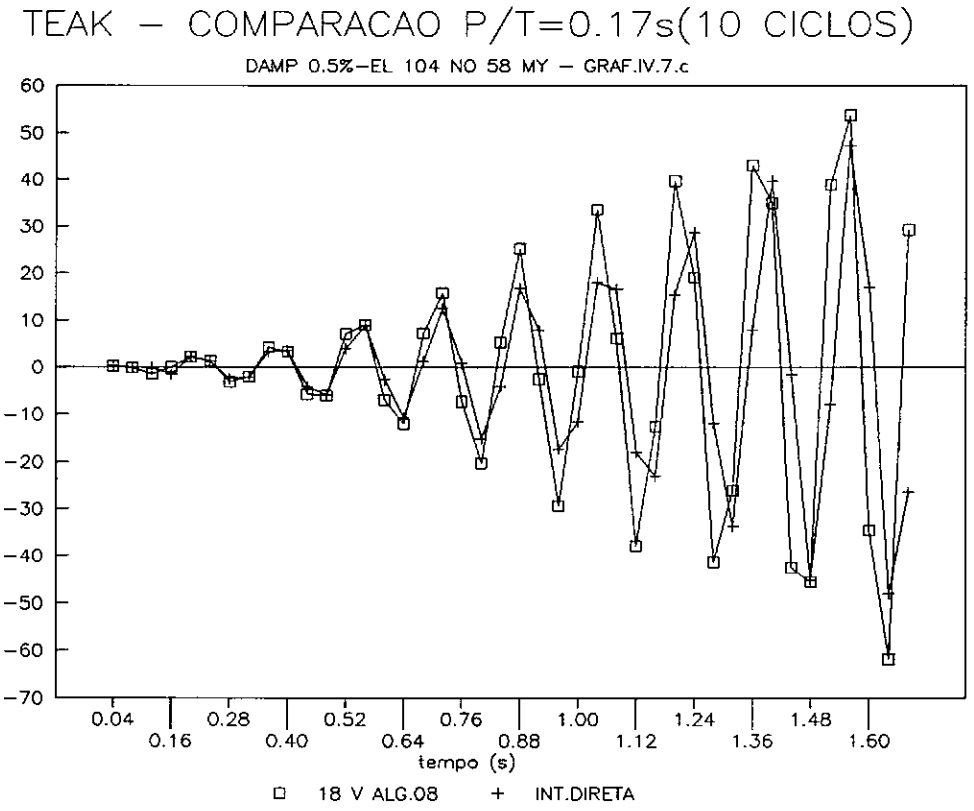

TEAK – COMPARACAO P/DIVERSOS PERIODOS
T=0.35s EL 104 NO 58 NX – GRAF.IV.5.l
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
−1
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
0.05
0.15
0.25
0.35
0.45
0.55
0.65
0.75
0.85
0.95
1.05
1.15
18V ALG 08
+ INT.DIRETA

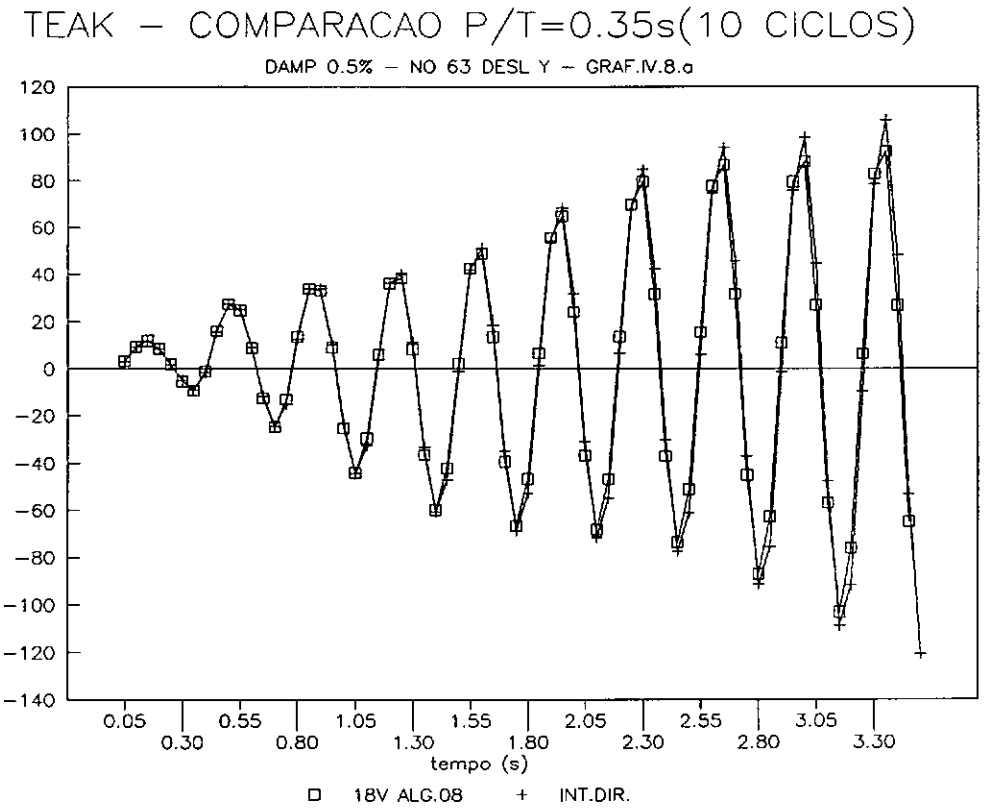

TEAK – COMPARACAO P/ T=0.12s(10 CICLOS)
DAMP 0.5% – NO 63 DESL Y – GRAF. IV.6.a
16
14
12
10
8
6
4
2
0
−2
−4
−6
−8
−10
−12
0.02 0.12 0.22 0.32 0.42 0.52 0.62 0.72 0.82 0.92 1.02 1.12
tempo (s)
18V ALG.08
+ INT.DIR.

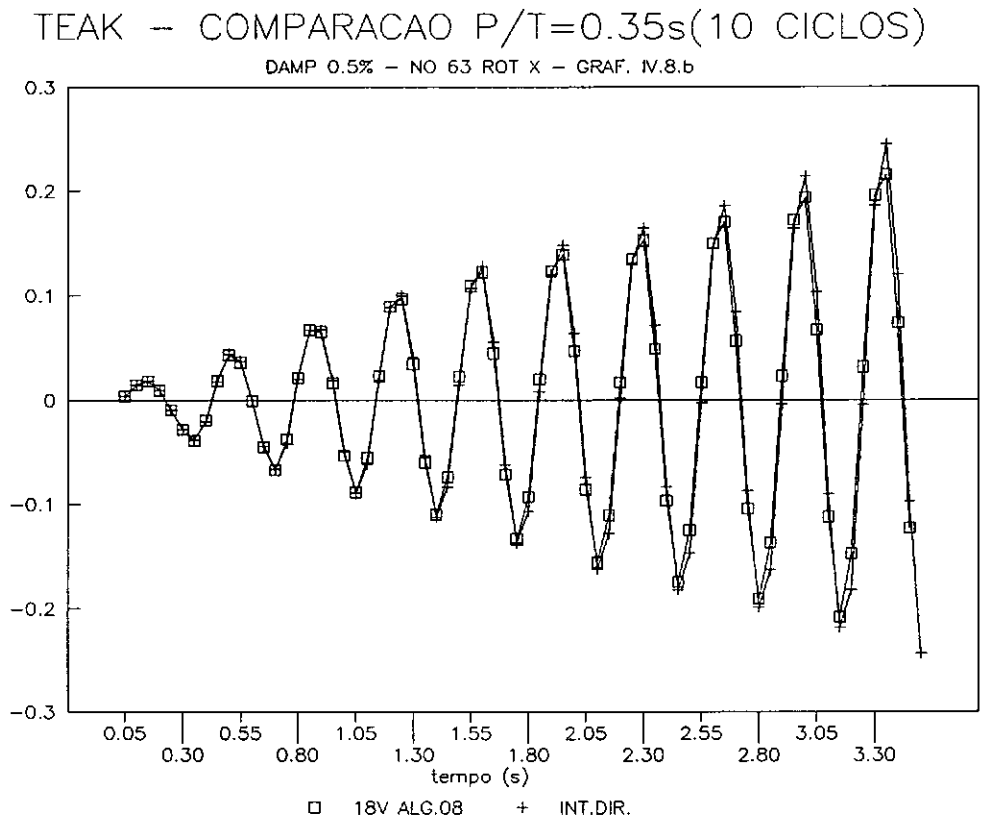

TEAK – COMPARACAO P/ T=0.12s(10 CICLOS)
DAMP 0.5%–EL 104 NO 58 NX – GRAF.IV.6.b
4
3
2
1
0
−1
−2
−3
−4
−5
0.02 0.12 0.22 0.32 0.42 0.52 0.62 0.72 0.82 0.92 1.02 1.12
tempo (s)
18V ALG.08
+ INT.DIR.


TEAK – COMPARACAO P/T=0.17s(10 CICLOS)
DAMP 0.5% – NO 63 DESL Y – GRAF. IV.7.a
50
40
30
20
10
0
−10
−20
−30
−40
−50
−60
0.04
0.16
0.28
0.40
0.52
0.64
0.76
0.88
1.00
1.12
1.24
1.36
1.48
1.60
tempo (s)
18 V ALG.08
+ INT.DIRETA


TEAK – COMPARACAO P/T=0.17s(10 CICLOS)
DAMP 0.5%–EL 104 NO 58 NX – GRAF.IV.7.b
14
12
10
8
6
4
2
0
−2
−4
−6
−8
−10
−12
0.04
0.16
0.28
0.40
0.52
0.64
0.76
0.88
1.00
1.12
1.24
1.36
1.48
1.60
tempo (s)
18 V ALG.08
+ INT.DIRETA

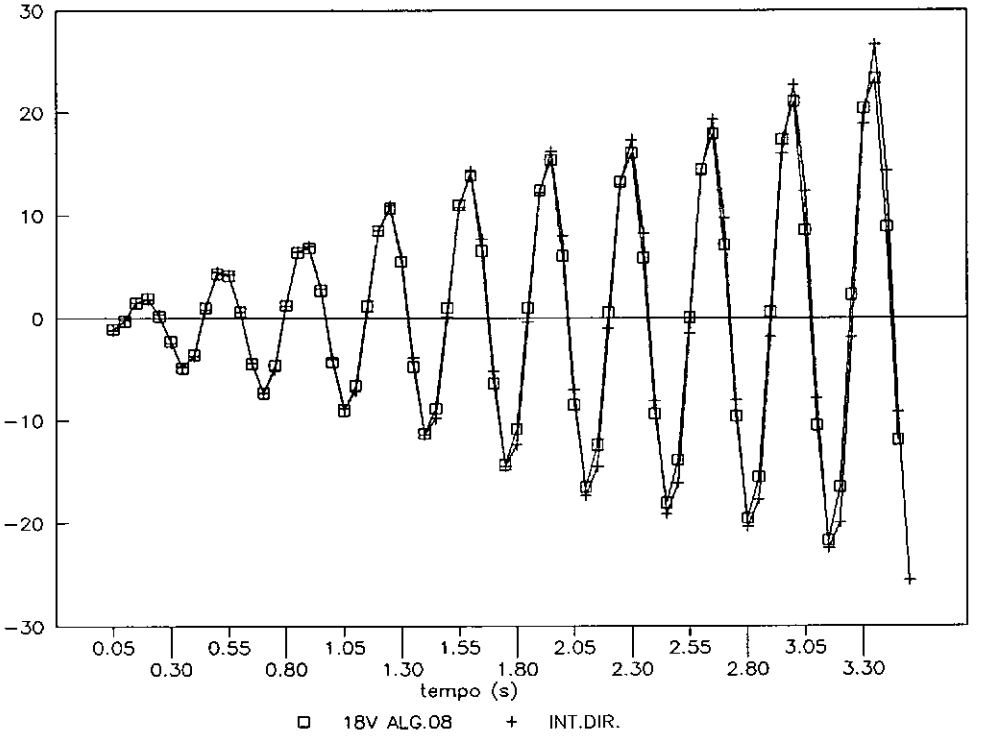

TEAK – COMPARACAO P/T=0.17s(10 CICLOS)
DAMP 0.5%–EL 104 NO 58 MY – GRAF.IV.7.c
60
50
40
30
20
10
0
−10
−20
−30
−40
−50
−60
−70
0.04
0.16
0.28
0.40
0.52
0.64
0.76
0.88
1.00
1.12
1.24
1.36
1.48
1.60
tempo (s)
18 V ALG.08
INT.DIRETA


TEAK – COMPARACAO P/T=0.35s(10 CICLOS)
DAMP 0.5% – NO 63 DESL Y – GRAF.IV.8.a
120
100
80
60
40
20
0
−20
−40
−60
−80
−100
−120
−140
0.05
0.30
0.55
0.80
1.05
1.30
1.55
1.80
2.05
2.30
2.55
2.80
3.05
3.30
tempo (s)
18V ALG.08
INT.DIR.


TEAK – COMPARACAO P/T=0.35s(10 CICLOS)
DAMP 0.5% – NO 63 ROT X – GRAF. IV.8.b
0.3
0.2
0.1
0
−0.1
−0.2
−0.3
0.05
0.30
0.55
0.80
1.05
1.30
1.55
1.80
2.05
2.30
2.55
2.80
3.05
3.30
tempo (s)
18V ALG.08
INT.DIR.

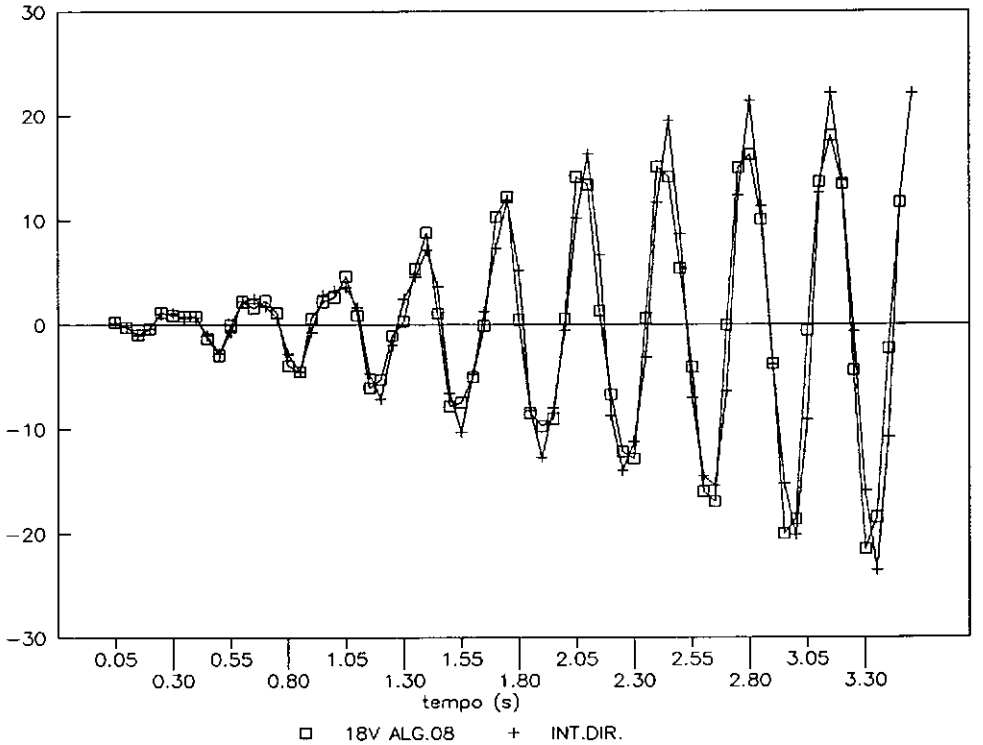
TEAK – COMPARACAO P/T=0.35s(10 CICLOS)

DAMP 0.5%–EL 104 NO 58 NX – GRAF.IV.8.c



TEAK – COMPARACAO P/T=0.35s(10 CICLOS)

DAMP 0.5%–EL 104 NO 58 MY – GRAF.IV.8.d



IV.3 - Conclusões:

De maneira geral, as conclusões do capítulo anterior foram confirmadas neste capítulo. A ortogonalização plena da base, através do Algoritmo 08, se mostrou bastante eficiente para o alcance dos períodos mais baixos, atingindo não só fator de participação de carga elevado, como massa efetiva também elevada.

Os problemas com os dois últimos períodos modais coincidentes com o período de excitação são bastante evidentes, tanto pelos deslocamentos e esforços, como pelo Erro Médio apresentado. Apesar dos valores mínimos de Erro Médio serem parecidos para $\bar{T} \leq 0.17s$, deve ser ressaltado que tratam-se de casos com ciclos diferentes. As diferenças em relação ao número de ciclos da análise mostram-se elevadas, resultando numa preocupação complementar para indicação da estabilização ou não do erro. Fato este que dificulta, pelo menos em parte, a determinação de um valor, percentual ou de outro número significativo a ser atribuído ao erro para que indique uma boa qualidade da resposta.

Verificando o comportamento do erro dentro do mesmo período de excitação (no caso com o último período modal) e com o mesmo número de ciclos, vê-se um valor muito baixo para o Critério 1, que apresenta uma base mais pobre que os demais critérios usados. Esta característica pode se dever ao fato do último período modal do Critério 1 estar bem acima do período de excitação (0.12s contra $\bar{T}=0.04s$). Portanto, deve se levar em conta o último período alcançado na análise para uma interpretação correta desse índice de qualidade da

resposta.

Para confirmação dos procedimentos mais avançados adotados neste capítulo, passaremos a usá-los no modelo do capítulo anterior, numa extensão da análise para PLAT3 no próximo capítulo.

CAPÍTULO V

APLICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS AVANÇADOS PARA O PRIMEIRO MODELO
EXTENSÃO DA ANÁLISE PARA BAIXOS PERÍODOS DE EXCITAÇÃO

V.1 - Descrição:

Diante dos fatos observados e conclusões dos Capítulos III e IV, voltou-se ao primeiro modelo (PLAT3) para estudo do comportamento dos novos procedimentos. A partir daí, com base nestes resultados, é possível se chegar às conclusões finais.

O ALGORITMO II.2, denominado Algoritmo 08, apontado no capítulo anterior pelos bons resultados dentre os vários testados, foi o utilizado para os testes.

Os períodos pesquisados foram $\bar{T}$=0.20s, 0.10s, já analisados por outros critérios, e 0.07s, período este extraído através da utilização do Algoritmo 08.

V.2 - Resultados e comentários:

O conjunto completo de tabelas e gráficos encontra-se ordenado no final deste item. Os gráficos mais significativos foram inseridos ao longo do texto.

Foram condensados todos os resultados das análises, Capítulo III inclusive, na TABELA V.1. Aí estão os Erros Médios, Desvios e Máximos Resíduos encontrados.

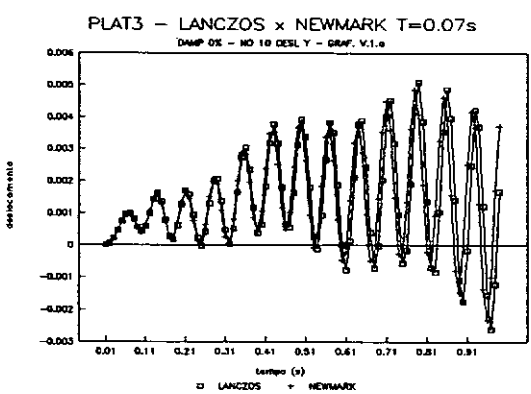
A TABELA V.2 apresenta os períodos alcançados, fatores de participação de carga e massa efetiva das análises. Devido à ocorrência de um fator de participação de carga maior que 1.00, quando da extração de 12 vetores ao ser usado o Algoritmo 08, foi feita uma análise extra com 11 vetores. Assim, para $\bar{T}$=0.20s foi feita a avaliação desses dois casos, de forma a comparar os resultados e avaliar a influência desse pequeno valor acima da unidade.

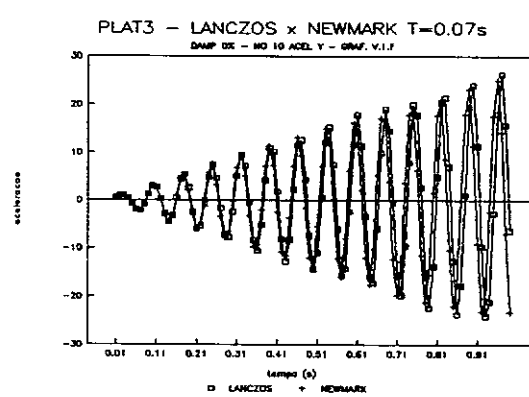
Neste modelo, apesar da ortogonalização dos vetores em relação a toda base usada no Algoritmo 08, foi possível obter-se apenas 12 vetores na base, e mesmo assim com um fator de participação de carga de 1.0001. Esse fato está associado às particularidades da geometria, tais como quantidade menor de graus de liberdade em relação ao modelo do capítulo anterior e condições de contorno para representação de meio modelo (simetria). Também o Algoritmo 08 apresentou perda da ortogonalidade entre os vetores, mostrando uma certa instabilidade, o que indica a necessidade de se usar um algoritmo com um processo de ortogonalização mais estável como o apontado no ALGORITMO II.3 (Algoritmo 10) para a obtenção de mais vetores na base. No entanto, a

quantidade de 12 vetores foi considerada satisfatória para os objetivos em questão, dando-se preferência ao estudo da qualidade da resposta para esse algoritmo de geração da base. Ao mesmo tempo, a comparação entre as respostas do Algoritmo 08 com 12 e 11 modos, indicou uma pequena diferença entre eles, apesar do caso com 12 vetores ter ultrapassado a unidade no fator de participação de carga. Essa comparação foi feita uma única vez para medição da influência dessa ocorrência, já que apenas se queria demonstrar sua pequena importância.

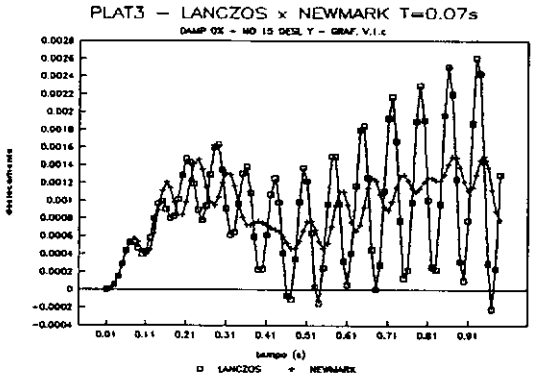
Os GRÁFICOS V.1, V.2 e V.3 apresentam os deslocamentos e acelerações significativas no nós 10 e 15 e esforços mais relevantes no elemento 08.

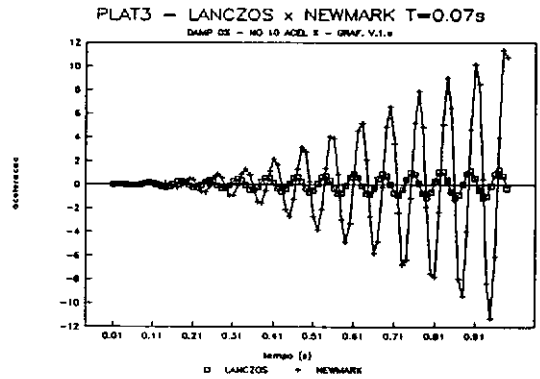
Os GRÁFICOS V.1 estão associados a $\bar{T}$=0.07s, e apresentam alguns resultados aproximados para o nó 10, tais como deslocamentos na direção "Y" (que apresenta defasagem em relação ao método de integração direta), deslocamento na direção "Z", a rotação em "Y" e aceleração em "Y", como se pode ver a seguir:





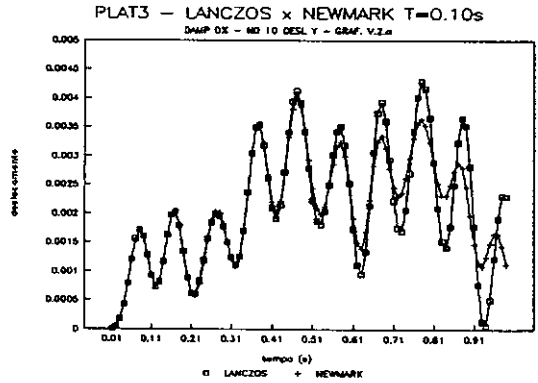
Porém, para o nó 15 (de maior resíduo) nenhuma resposta apresenta-se com boa aproximação, como podemos ver abaixo, igualmente a aceleração em "X" para o nó 10.

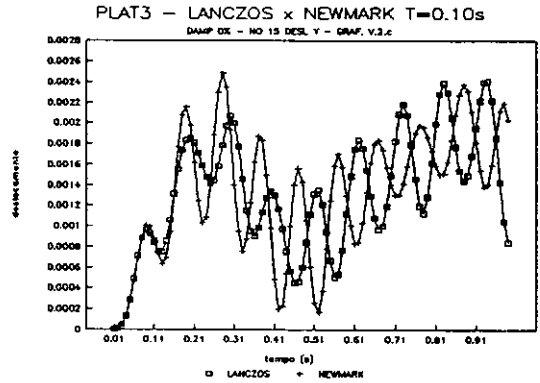




Assim, podemos afirmar que, diante dos parâmetros de erro (que coincidem com a resposta obtida) a resposta apresenta baixa qualidade, confirmando as conclusões dos últimos dois capítulos sobre a coincidência entre o período da carga e os últimos períodos modais da análise.

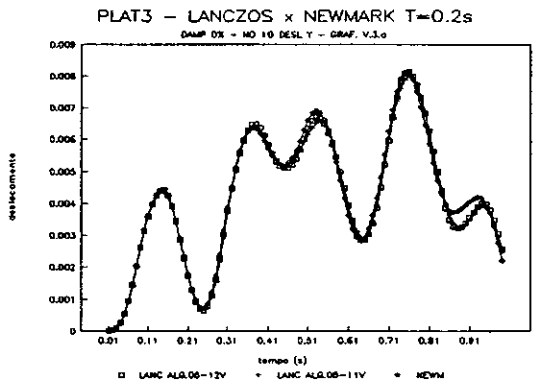
Os GRÁFICOS V.2 são relativos a $\bar{T}$=0.10s e, de forma similar ao anterior, também não apresentam uma boa resposta tanto para deslocamentos como para esforços ou acelerações. Apenas o deslocamento na direção "Y" apresenta uma aparência similar à obtida pelo método de integração direta. Os próximos gráficos destacam alguns desses resultados.

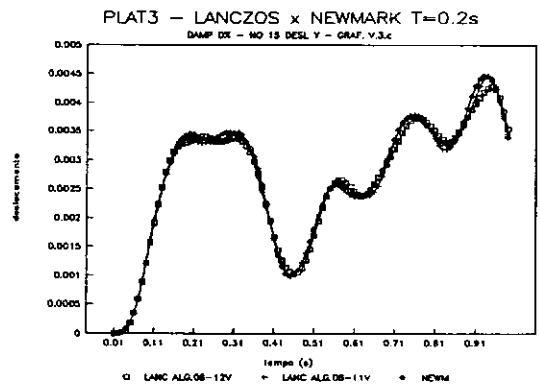


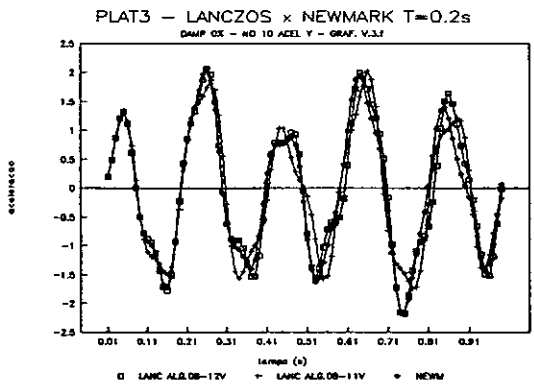


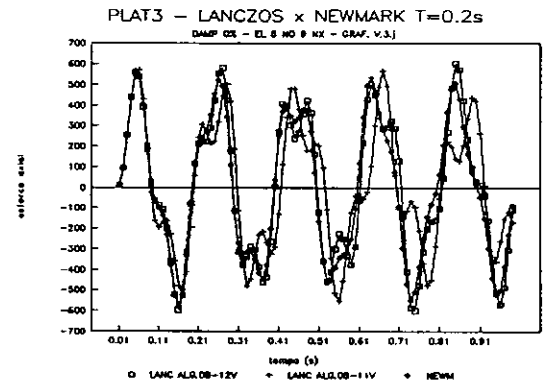
Mais uma vez coincidem os parâmetros de erro com as informações obtidas, indicando uma resposta de má qualidade.

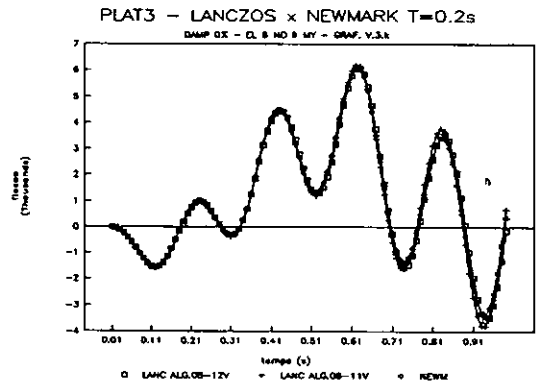
Os GRÁFICOS V.3, relacionados à excitação de $\bar{T}$=0.20s, apresentam a comparação entre o Algoritmo 08 com 12 e 11 modos e os resultados da integração direta. Foi obtida uma boa aproximação nos resultados mais importantes. Os parâmetros de erro indicam uma resposta aceitável, como se pode ver em função dos resultados aqui destacados:

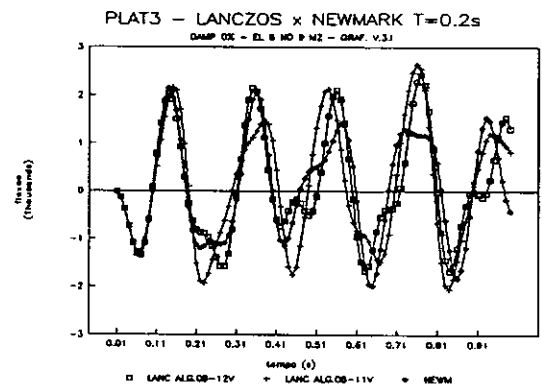




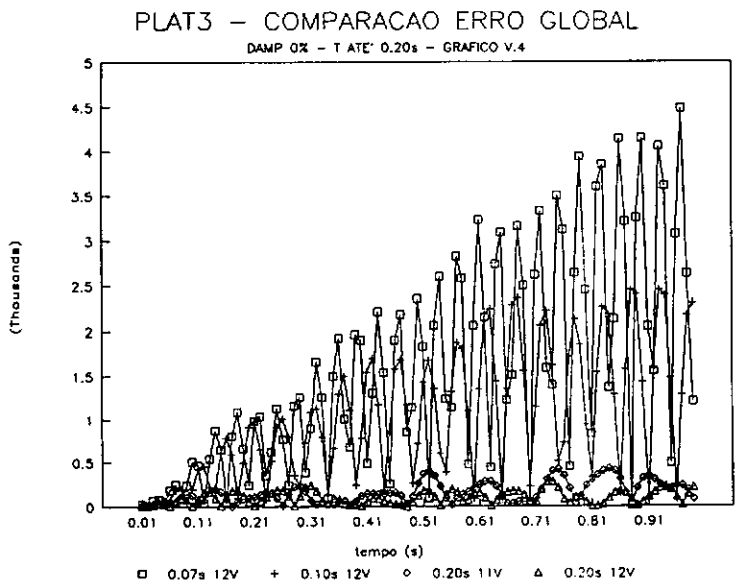








O GRÁFICO V.4 apresenta uma comparação, ao longo do tempo, dos diversos erros para as várias análises efetuadas nesse capítulo. Aí podem ser vistos: a tendência de crescimento do erro global ao longo do tempo para $\bar{T}$=0.07s, uma certa estabilização para o $\bar{T}$=0.10s após o sexto ciclo e os valores estabilizados para $\bar{T}$=0.20s com 11 e 12 vetores, indicando uma discreta melhoria para o caso com 12 vetores.



A TABELA V.1 expõe a evolução dos parâmetros de erro, e mais uma vez observou-se a péssima resposta para períodos de excitação iguais ao último e penúltimo períodos modais da análise, períodos esses que baixaram em relação às análises anteriores, devido à extração de períodos modais mais baixos com esse novo algoritmo.

Deve ser prestada atenção aos elevados valores de aceleração para os baixos períodos de excitação. Podemos observar que, mesmo para esse modelo, o incremento de acelerações apresentou-se alto para o período $\bar{T}$=0.07s (12

vezes maior que para o caso $\bar{T}$=0.20s e 5 vezes maior que $\bar{T}$=0.10s), onde uma pequena diferença no valor da aceleração encontrada pode resultar num significativo resíduo. Contudo, como o modelo utilizado apresenta preponderância da parcela elástica devida a sua grande rigidez (o que pode ser constatado pela baixa massa efetiva na direção "Y" envolvida na análise), ainda podemos acompanhar a variação do erro pelos deslocamentos e esforços, diferentemente do ocorrido no exemplo do Capítulo IV.

Comparando os GRÁFICOS V.3 com os III.1, pode se observar que a representação do esforço axial para o elemento estrutural 08 apresentou significativa melhora no caso dos procedimentos avançados, bem como para o deslocamento e a aceleração em "Y" para o nó 10.

PLAT3 - DAMP 0% CARGA NA DIRECAO Y GLOBAL
AMPLITUDE MAXIMA DE TODAS AS CARGAS = 2120

TABELA COM RESULTADOS DE TODAS AS ANALISES

DESCRICAO	MODOS	PERIODO	ERRO MEDIO	DESVIO	MAX.RESID.	NO	t(s)	DIR.	dt (s)	passo
S/CORR (0)	3	T=10.0s	18.72	10.88	25.90	9	6.20	Y	0.05	3
S/CORR (1)	6	T=10.0s	3.75	2.59	-6.00	10	6.60	Y	0.05	3
S/CORR (0)	3	T=6.0s	31.30	18.21	43.40	9	6.20	Y	0.05	3
C/CORR ATUAL	4	T=6.0s	31.07	15.28	-46.30	9	1.90	Y	0.05	3
S/CORR (1)	6	T=6.0s	6.29	4.31	-9.98	10	2.40	Y	0.05	3
C/CORR (2a)	7	T=6.0s	6.63	4.32	10.50	10	6.75	Y	0.05	3
S/CORR (0)	3	T=2.4s	74.15	45.78	-109.00	9	0.90	Y	0.05	3
C/CORR ATUAL	4	T=2.4s	139.37	70.97	187.00	10	8.50	Y	0.05	3
S/CORR (1)	6	T=2.4s	21.45	11.95	-32.20	10	6.60	Y	0.05	3
C/CORR (2a)	7	T=2.4s	21.55	11.75	-32.70	10	6.90	Y	0.05	3
S/CORR (1)	6	T=1.1s	36.39	25.33	-59.40	10	2.40	Y	0.05	3
C/CORR (2b)	7	T=1.1s	18.77	12.76	-29.80	10	0.40	Y	0.05	3
S/CORR (0)	3	T=1.0s	231.10	160.52	394.00	9	6.20	Y	0.05	3
C/CORR ATUAL	4	T=1.0s	335.40	188.14	-577.00	9	1.20	Y	0.05	3
S/CORR (1)	6	T=1.0s	42.67	29.90	-71.30	10	2.40	Y	0.05	3
C/CORR (2a)	7	T=1.0s	44.63	29.99	71.70	10	2.55	Y	0.05	3
S/CORR (1)	6	T=0.7s	63.51	55.92	-134.00	10	3.80	Y	0.05	3
C/CORR (2b)	7	T=0.7s	26.75	18.22	47.50	10	4.90	Y	0.05	3
S/CORR (0)	3	T=0.5s	727.14	535.33	-1250.00	9	4.10	Y	0.05	3
C/CORR ATUAL	4	T=0.5s	446.50	187.50					0.05	3
S/CORR (1)	6	T=0.5s	261.78	161.40	-431.00	10	2.40	Y	0.05	3
C/CORR (2a)	7	T=0.5s	207.64	149.62	-376.00	10	2.40	Y	0.05	3
S/CORR (1)	6	T=0.5s	265.49	178.43	-465.00	10	2.40	Y	0.01	5
S/CORR (1)	6	T=0.46s	307.38	202.83	619.00	10	2.12	Y	0.05	3
C/CORR (2b)	7	T=0.46s	151.35	106.81	354.00	9	2.08	Y	0.05	3
S/CORR (1)	6	T=0.35s	489.46	411.06	-897.00	10	1.22	Y	0.05	3
C/CORR (2b)	7	T=0.35s	88.29	76.32	-198.00	10	1.04	Y	0.05	3
S/CORR (1)	6	T=0.2s	203.10	120.02	276.00	10	5.25	Y	0.05	3
C/CORR (2a)	7	T=0.2s	201.52	118.84	268.00	10	1.05	Y	0.05	3
S/CORR (1)	6	T=0.2s	241.75	177.58	-361.00	10	0.78	Y	0.005	3
C/CORR (2b)	7	T=0.2s	417.78	309.31	-784.00	10	0.95	Y	0.05	3
ALG.08	11	T=0.2s	157.96	113.67	235.00	15	0.84	Y	0.05	3
ALG.08	12	T=0.2s	101.91	70.79	178.00	15	0.74	Y	0.05	3
S/CORR (0)	6	T=0.1s	2635.74	1731.11	3400.00	10	0.68	Y	0.05	3
C/CORR (2b)	7	T=0.1s	1754.49	1141.86	-2520.00	10	0.68	Y	0.05	3
ALG.08	12	T=0.1s	1035.85	752.53	1530.00	15	0.88	Y	0.05	3
ALG.08	12	T=0.07s	1552.15	1215.48	-2790.00	15	0.97	Y	0.05	3

TABELA V.1

CRITERIO DE PARADA:
- S/CORR (0) - CRITERIO 0
- S/CORR (1) - CRITERIO 1
- C/CORR ATUAL.- VETOR ESTATICO
- C/CORR (2a) - CRITERIO 2a
- C/CORR (2b) - CRITERIO 2b

EXTENSÃO DAS ANÁLISES - PLAT3

RESUMO TOTAL

PERÍODOS(s)

	3 MODOS	6 MODOS 10% ERRO	7 MODOS Atual. vetor estático	7 MODOS 5% ERRO	ALG.08 11 MODOS	ALG.08 12 MODOS
1	2.4080	2.4080	2.4080	2.4080	2.4080	2.4080
2	0.7104	1.3530	1.3600	1.3740	1.3740	1.3740
3	0.3220	0.7120	1.3020	1.1000	1.1020	1.1020
4		0.4630	0.7120	0.7120	0.8744	0.8744
5		0.3513	0.4539	0.3525	0.7371	0.7372
6		0.1076	0.3513	0.2189	0.7120	0.7120
7			0.1075	0.0930	0.3525	0.3525
8					0.2689	0.2703
9					0.2137	0.2170
10					0.1226	0.1447
11					0.0767	0.1071
12						0.0725
F.P.C.	0.6747	0.9036	0.9041	0.9600	0.9961	1.0001
MASS X	0.0018	0.0072	-	0.0109	0.0159	0.0210
MASS Y	0.5035	0.5377	-	0.5794	0.6826	0.6827
MASS Z	0.0001	0.0022	-	0.0056	0.0087	0.0152
Mtotal	0.2041	0.2089	0.2250	0.2245	0.2740	0.2804

TABELA V.2

EXTENSÃO DAS ANÁLISES - PLAT3

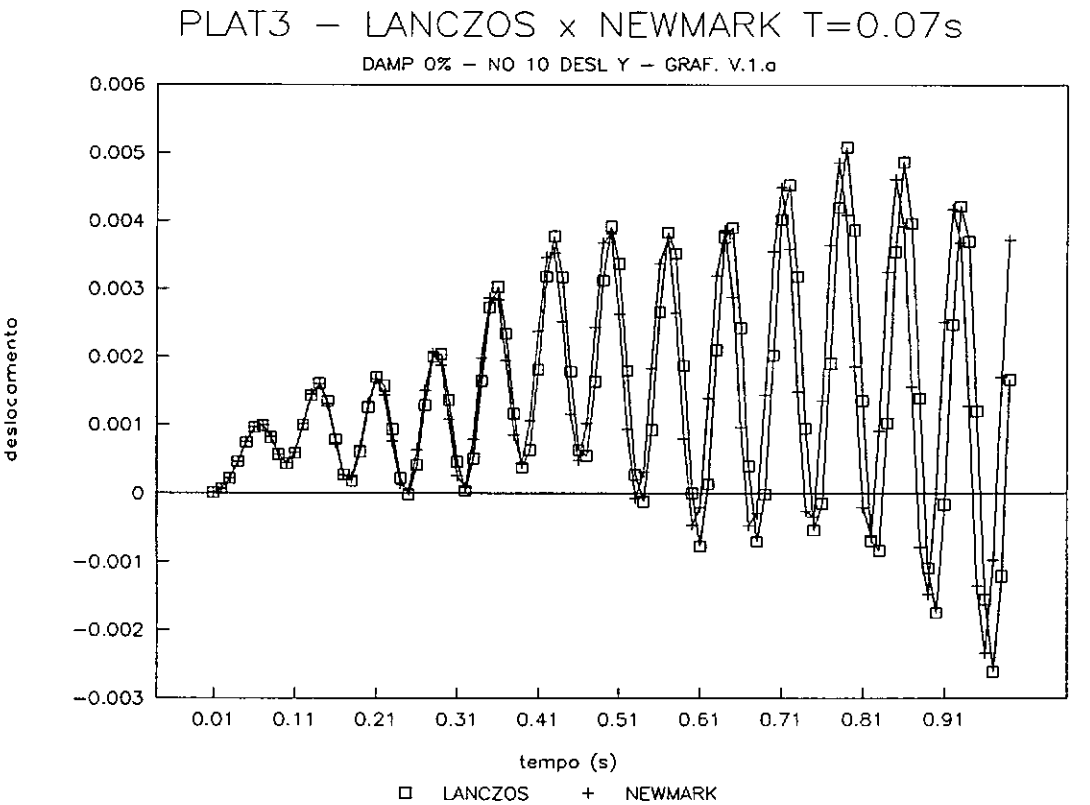
VALORES MÁXIMOS EM MÓDULO - $\bar{T}$=0.07s

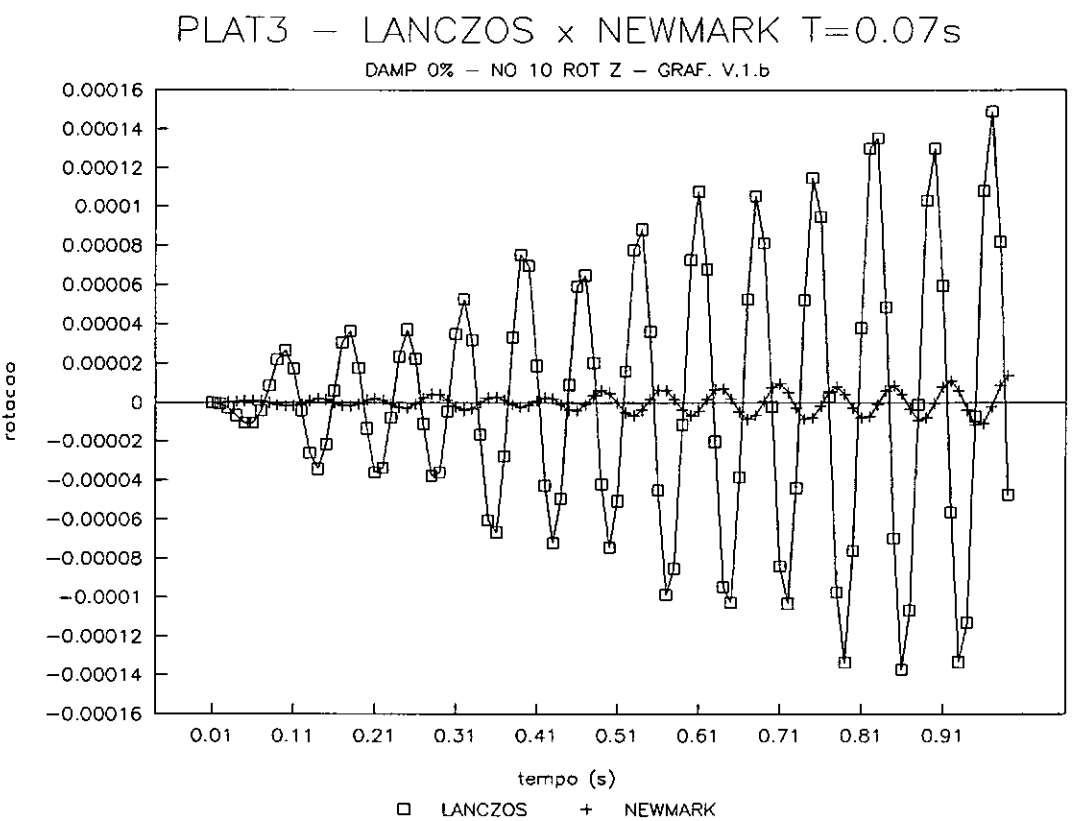
ALGORITMO 08 (12 MODOS)
x
MÉTODO DE INTEGRAÇÃO DIRETA

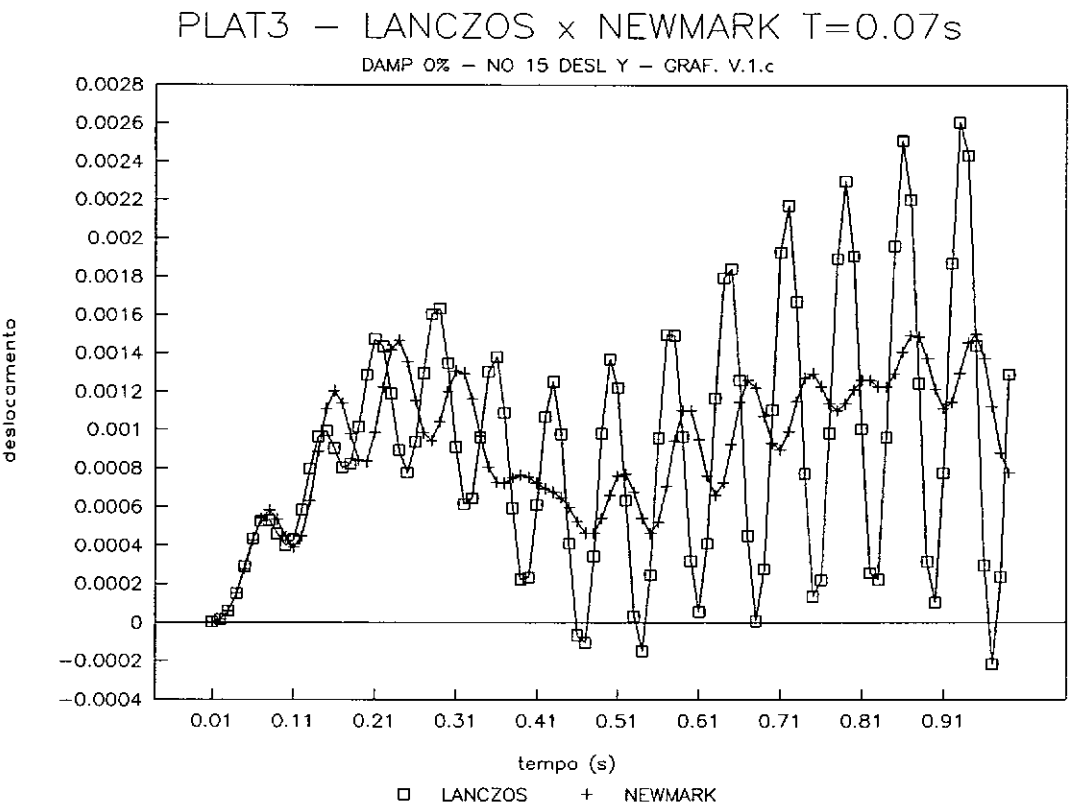
	NO	ALG.08 12 MODOS		MET. DIRETO	
		DESL Y	ACEL Y	DESL Y	ACEL Y
	1	.327E-2	.667E+1	-	-
	9	.504E-2	.287E+2	-	-
	10	.508E-2	.263E+2	.486E-2	.250E+2
	14	.267E-2	.107E+2	-	-
	15	.261E-2	.103E+2	.150E-2	.184E+1
	21	.197E-3	.326E+0	-	-
EL	NO	NX	QY	NX	QY
1	1	.136E+3	.320E+3	-	-
6	6	.843E+3	.918E+3	-	-
7	7	.141E+4	.160E+1	-	-
8	9	.132E+5	.469E+2	.115E+5	.433E+2
21	4	.129E+4	.259E+3	.804E+3	.268E+3
23	9	.614E+3	.131E+3	-	-

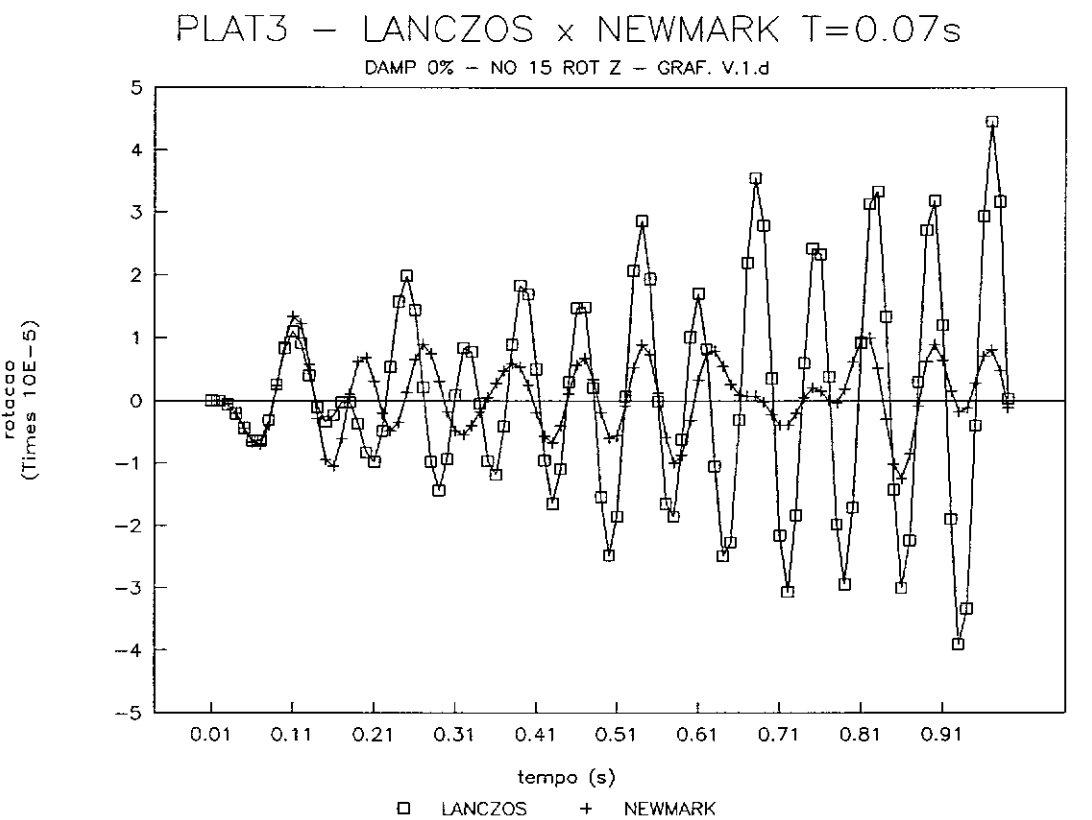
ERRO MÉDIO	1552.2	
DESVIO	1215.5	
RESID (MAX)	-2790.0 0.97s	=>NÓ 15 DIR.Y

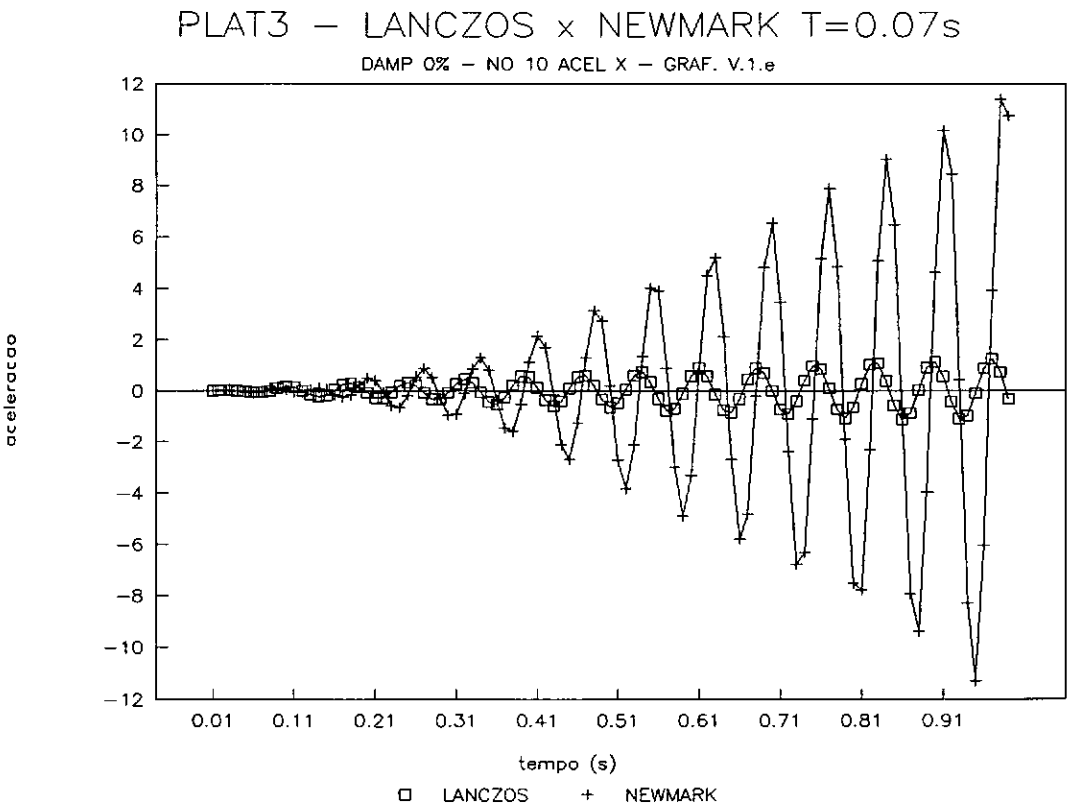
TABELA V.3

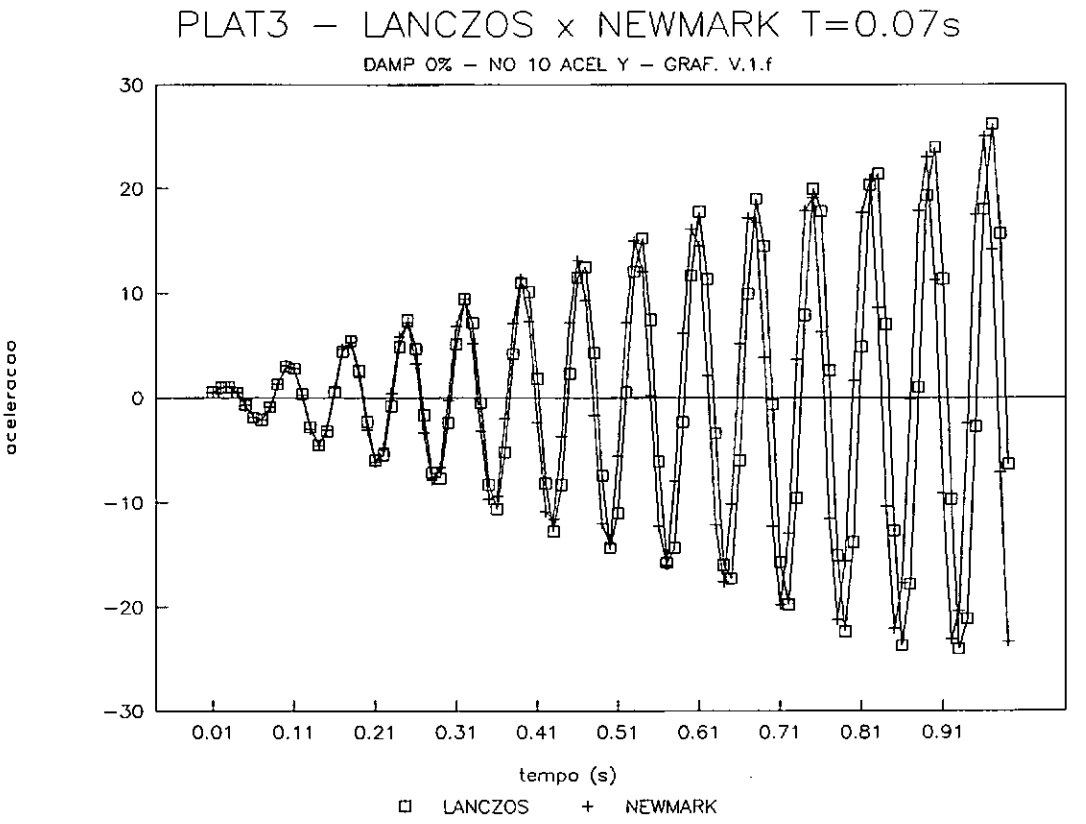

PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.07s
DAMP 0% – NO 10 DESL Y – GRAF. V.1.a
deslocamento
0.006
0.005
0.004
0.003
0.002
0.001
0
−0.001
−0.002
−0.003
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANCZOS
+ NEWMARK

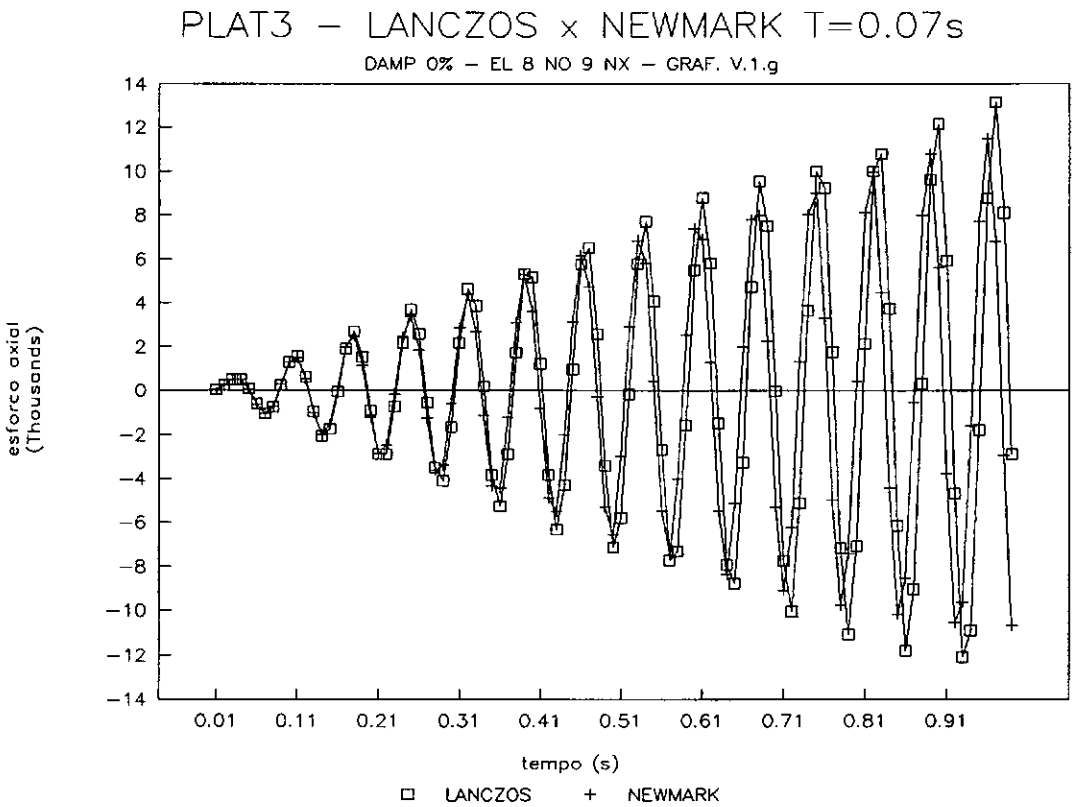

PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.07s
DAMP 0% – NO 10 ROT Z – GRAF. V.1.b
rotacao
0.00016
0.00014
0.00012
0.0001
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0
−0.00002
−0.00004
−0.00006
−0.00008
−0.0001
−0.00012
−0.00014
−0.00016
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANCZOS
+ NEWMARK

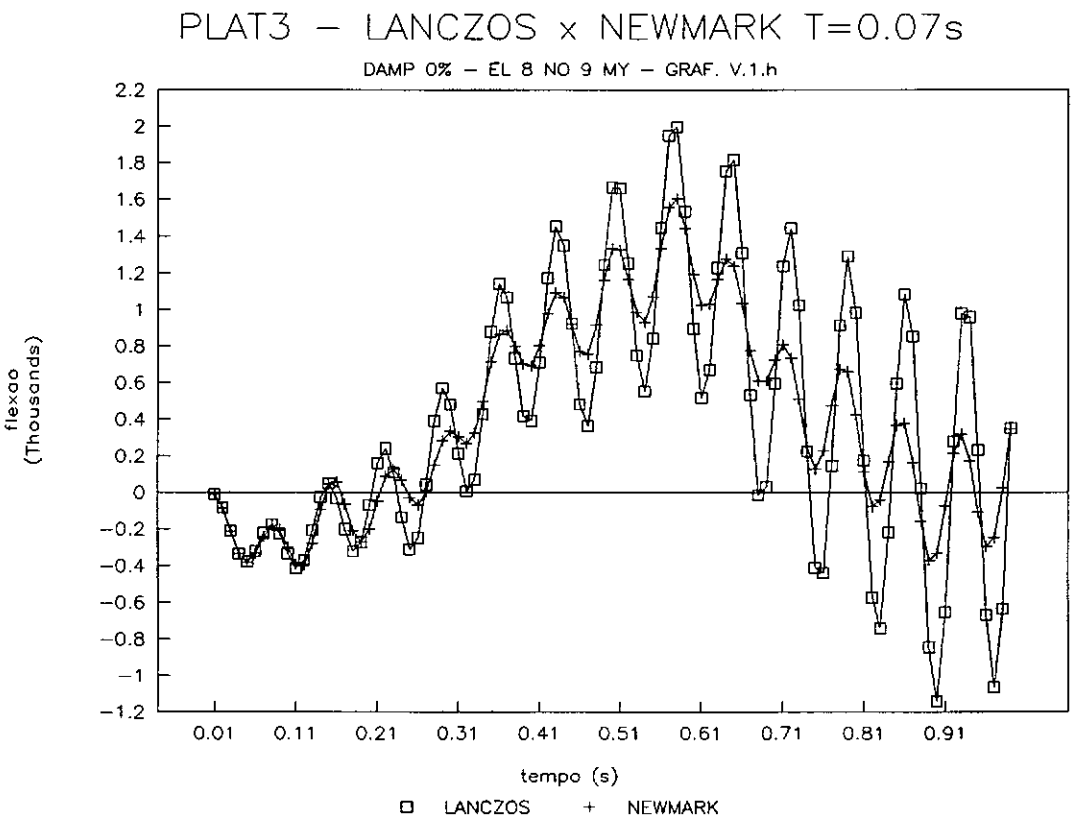

PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.07s
DAMP 0% – NO 15 DESL Y – GRAF. V.1.c
deslocamento
0.0028
0.0026
0.0024
0.0022
0.002
0.0018
0.0016
0.0014
0.0012
0.001
0.0008
0.0006
0.0004
0.0002
0
−0.0002
−0.0004
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANCZOS
NEWMARK

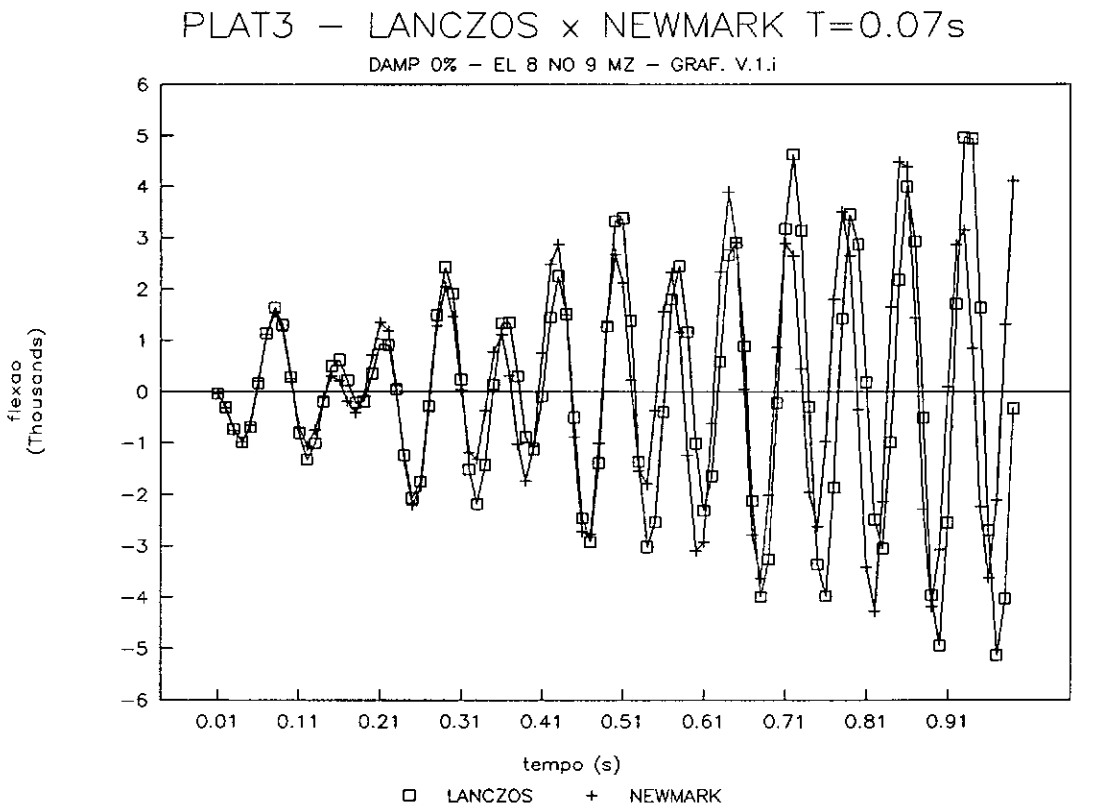

PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.07s
DAMP 0% – NO 15 ROT Z – GRAF. V.1.d
rotacao
(Times 10E−5)
5
4
3
2
1
0
−1
−2
−3
−4
−5
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANCZOS
NEWMARK


PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.07s
DAMP 0% – NO 10 ACEL X – GRAF. V.1.e
aceleracao
12
10
8
6
4
2
0
−2
−4
−6
−8
−10
−12
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANCZOS
NEWMARK


PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.07s
DAMP 0% – NO 10 ACEL Y – GRAF. V.1.f
aceleracao
30
20
10
0
−10
−20
−30
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANCZOS
NEWMARK


PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.07s
DAMP 0% – EL 8 NO 9 NX – GRAF. V.1.g
esforco axial (Thousands)
14
12
10
8
6
4
2
0
−2
−4
−6
−8
−10
−12
−14
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANCZOS
NEWMARK


PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.07s
DAMP 0% – EL 8 NO 9 MY – GRAF. V.1.h
flexao (Thousands)
2.2
2
1.8
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
−0.2
−0.4
−0.6
−0.8
−1
−1.2
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANCZOS
NEWMARK


PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.07s
DAMP 0% – EL 8 NO 9 MZ – GRAF. V.1.i
flexao
(Thousands)
6
5
4
3
2
1
0
−1
−2
−3
−4
−5
−6
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANCZOS
NEWMARK

EXTENSÃO DAS ANÁLISES - PLAT3

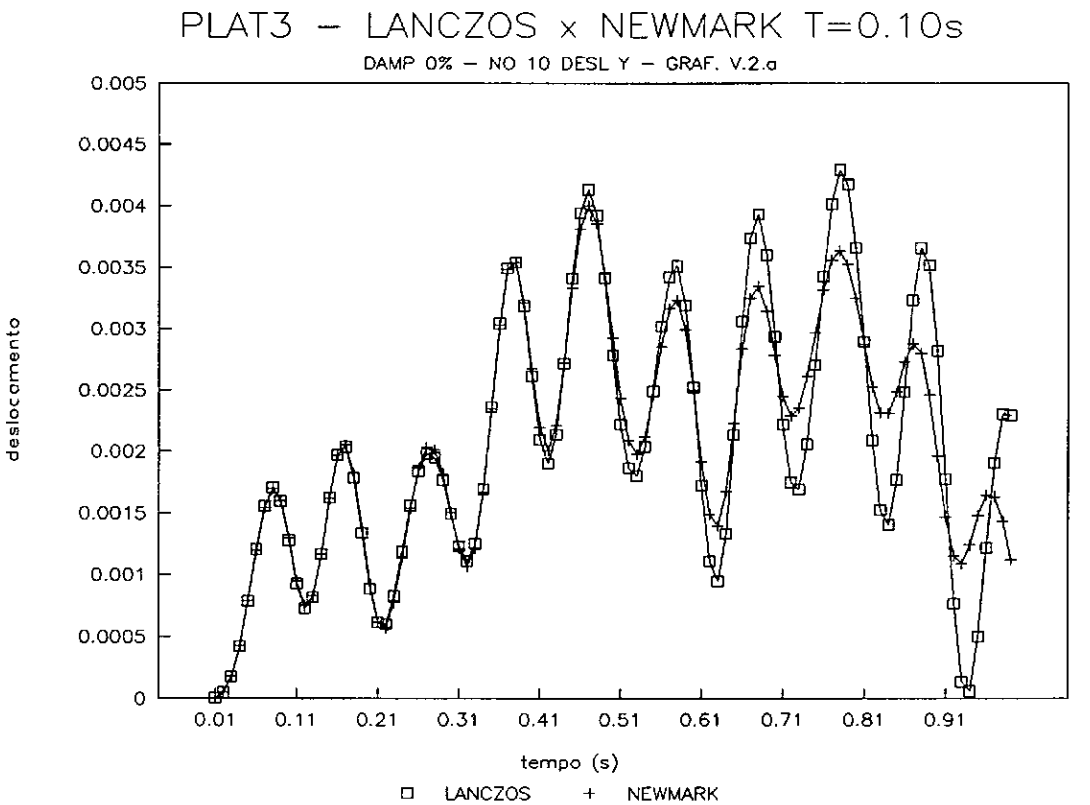
VALORES MÁXIMOS EM MÓDULO - $\bar{T}$=0.10s

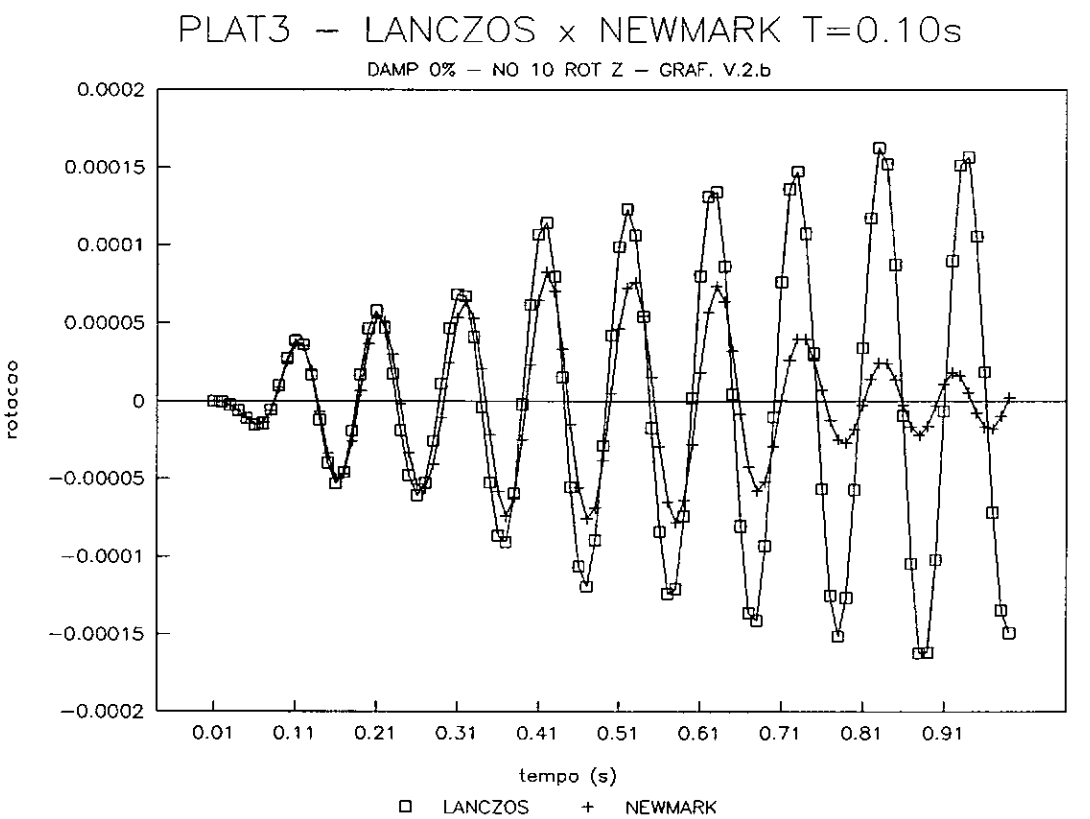
ALGORITMO 08 (12 MODOS)
x
MÉTODO DE INTEGRAÇÃO DIRETA

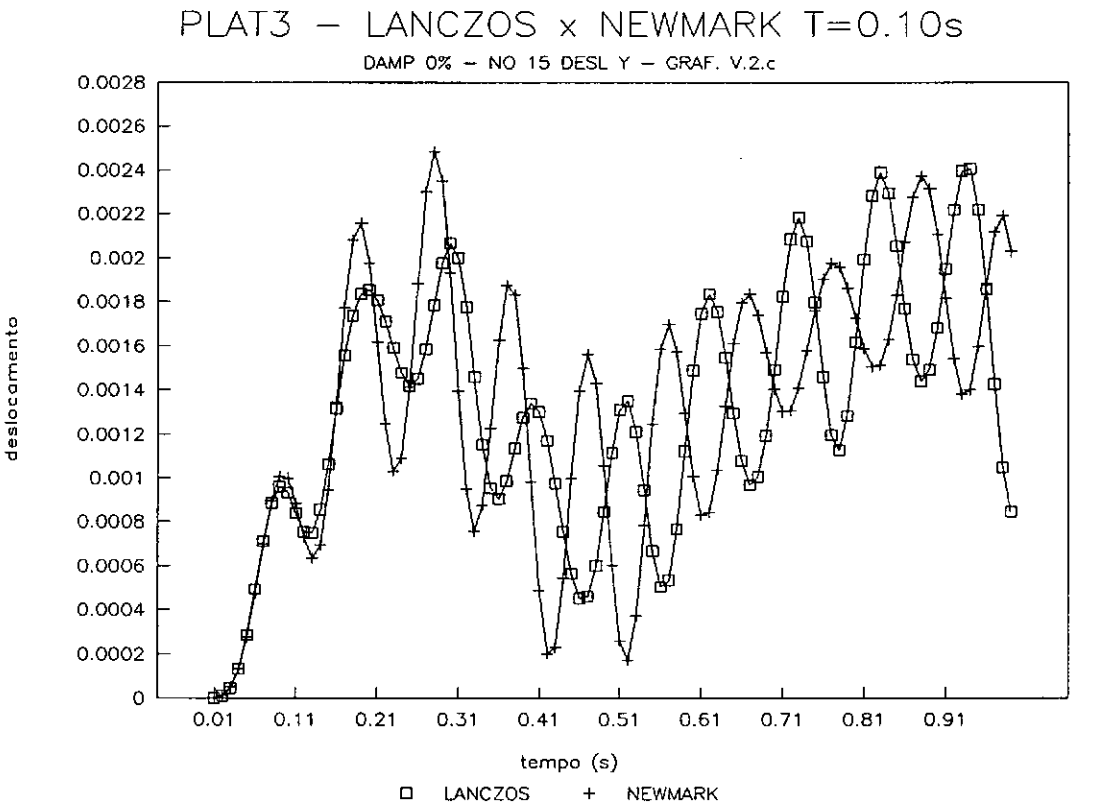
	NO	ALG.08 12 MODOS		MET. DIRETO	
		DESL Y	ACEL Y	DESL Y	ACEL Y
	1	.444E-2	.295E+1	-	-
	9	.419E-2	.475E+1	-	-
	10	.429E-2	.590E+1	.400E-2	.413E+1
	14	.286E-2	.393E+1	-	-
	15	.241E-2	.237E+1	.249E-2	.340E+1
	21	.323E-3	.318E+0	-	-
EL	NO	NX	QY	NX	QY
1	1	.272E+2	.127E+3	-	-
6	6	.130E+4	.124E+4	-	-
7	7	.402E+3	.172E+1	-	-
8	9	.126E+4	.417E+3	.118E+4	.202E+3
21	4	.693E+3	.158E+3	.180E+3	.144E+3
23	9	.314E+3	.864E+2	-	-

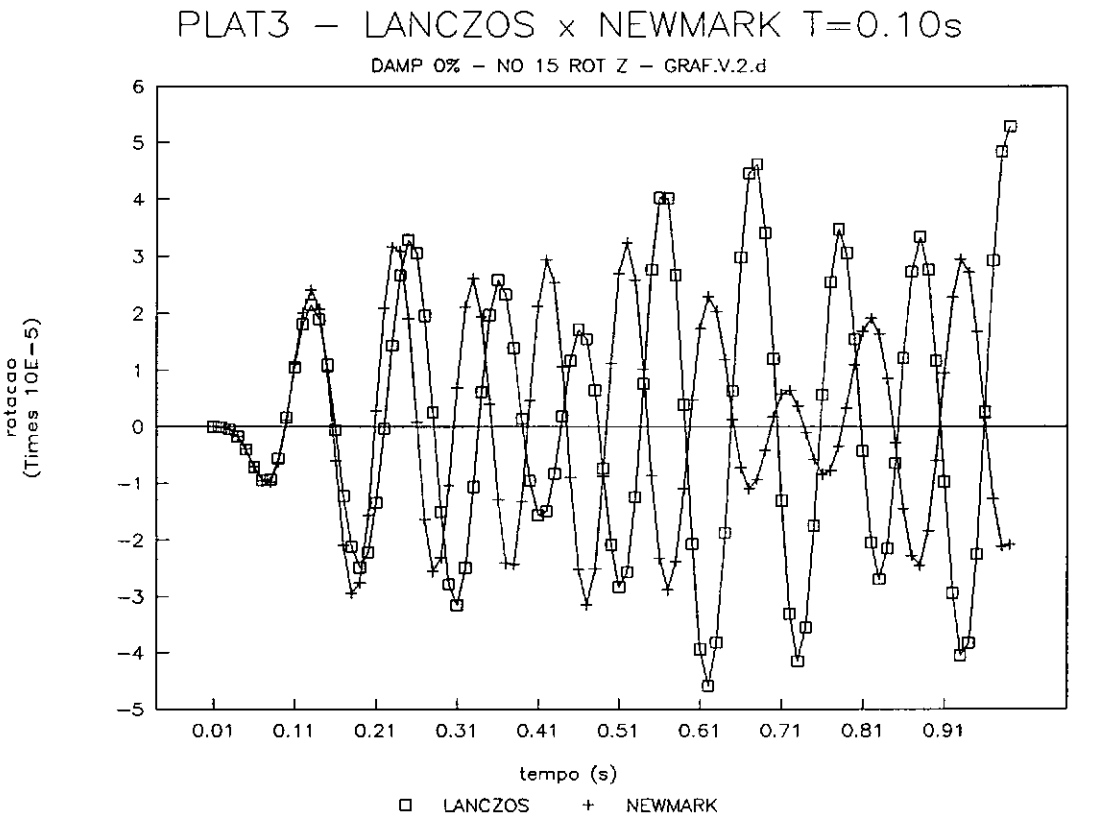
ERRO MÉDIO	1035.9	
DESVIO	752.5	
RESID (MAX)	1530.0 0.88s	=>NÓ 15 DIR.Y

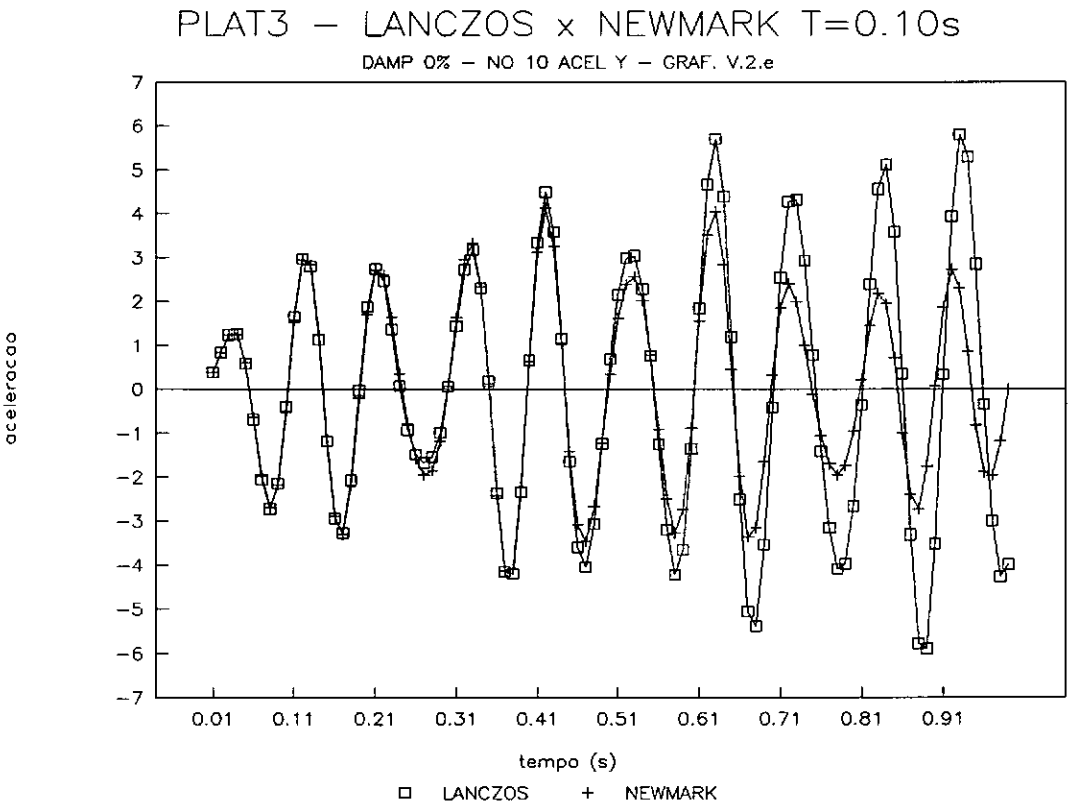
TABELA V.4

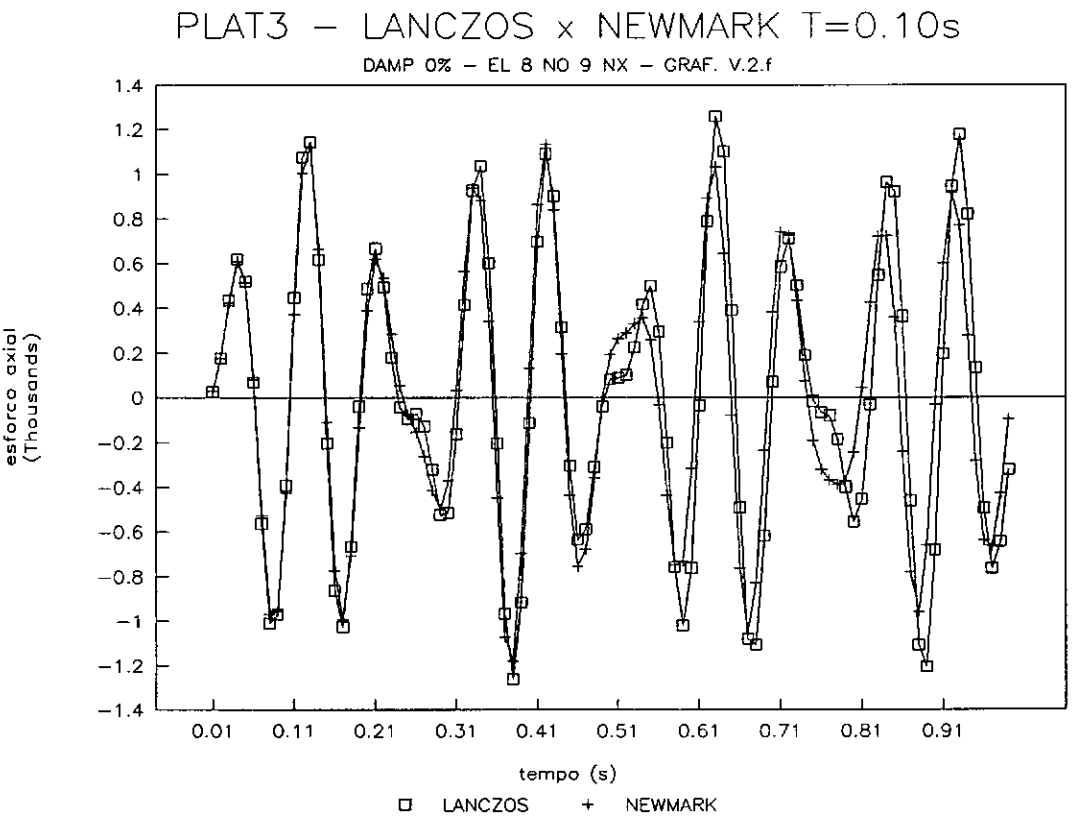

PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.10s
DAMP 0% – NO 10 DESL Y – GRAF. V.2.a
deslocamento
0.005
0.0045
0.004
0.0035
0.003
0.0025
0.002
0.0015
0.001
0.0005
0
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANCZOS
NEWMARK

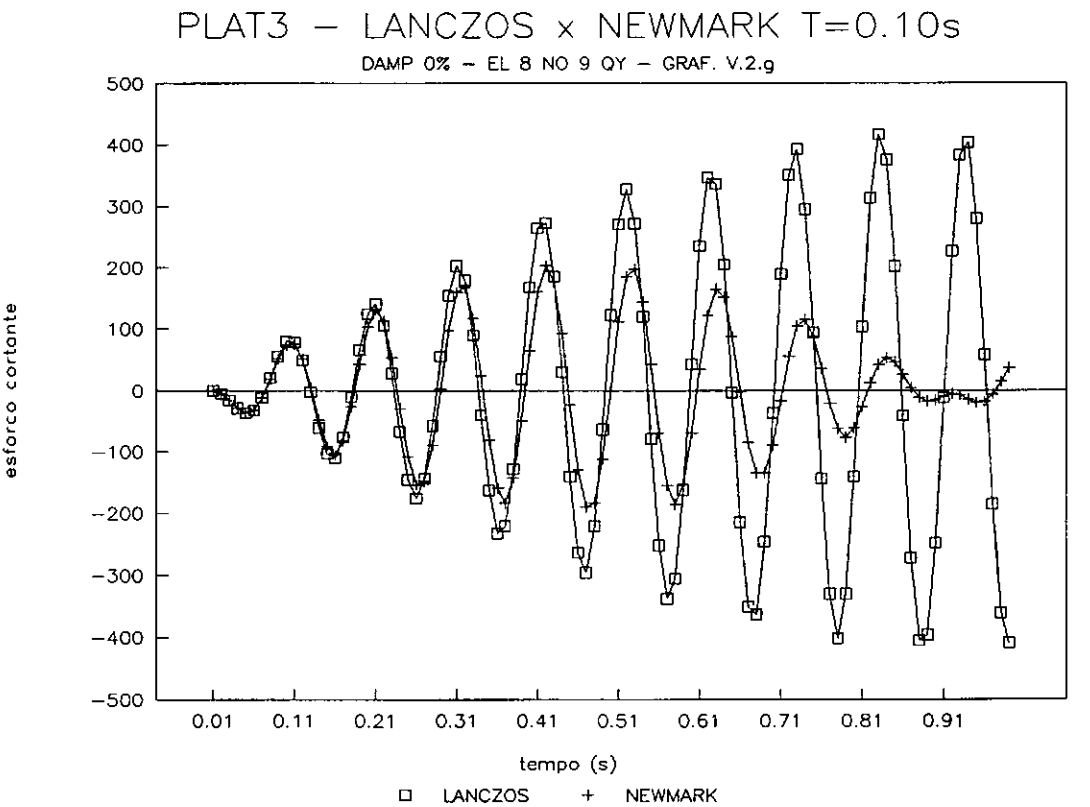

PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.10s
DAMP 0% – NO 10 ROT Z – GRAF. V.2.b
rotacao
0.0002
0.00015
0.0001
0.00005
0
−0.00005
−0.0001
−0.00015
−0.0002
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANCZOS
NEWMARK

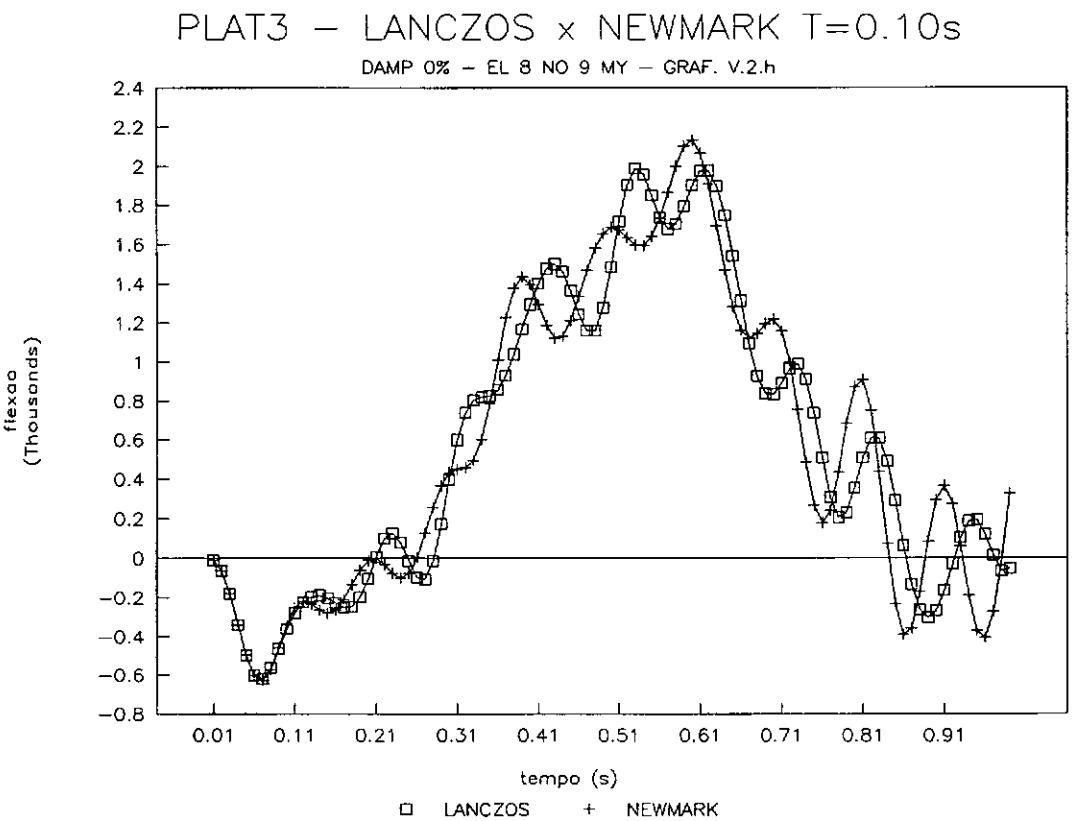

PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.10s
DAMP 0% – NO 15 DESL Y – GRAF. V.2.c
deslocamento
0.0028
0.0026
0.0024
0.0022
0.002
0.0018
0.0016
0.0014
0.0012
0.001
0.0008
0.0006
0.0004
0.0002
0
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANCZOS
NEWMARK

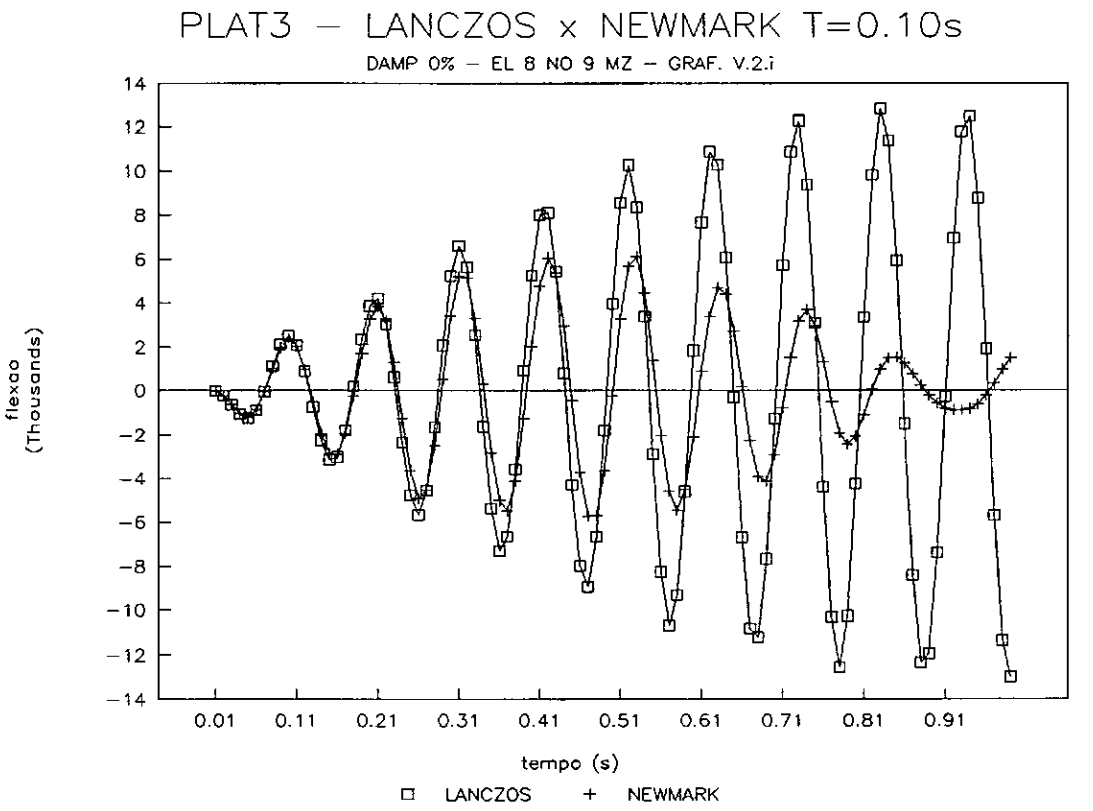

PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.10s
DAMP 0% – NO 15 ROT Z – GRAF.V.2.d
rotacao
(Times 10E-5)
6
5
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
-5
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANCZOS
NEWMARK


PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.10s
DAMP 0% – NO 10 ACEL Y – GRAF. V.2.e
aceleracao
7
6
5
4
3
2
1
0
−1
−2
−3
−4
−5
−6
−7
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANCZOS
NEWMARK


PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.10s
DAMP 0% – EL 8 NO 9 NX – GRAF. V.2.f
esforco axial
(Thousands)
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
−0.2
−0.4
−0.6
−0.8
−1
−1.2
−1.4
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANCZOS
NEWMARK


PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.10s
DAMP 0% – EL 8 NO 9 QY – GRAF. V.2.g
esforco cortante
500
400
300
200
100
0
−100
−200
−300
−400
−500
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANCZOS
NEWMARK


PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.10s
DAMP 0% – EL 8 NO 9 MY – GRAF. V.2.h
flexao
(Thousands)
2.4
2.2
2
1.8
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
−0.2
−0.4
−0.6
−0.8
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANCZOS
NEWMARK


PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.10s
DAMP 0% – EL 8 NO 9 MZ – GRAF. V.2.i
flexao
(Thousands)
14
12
10
8
6
4
2
0
−2
−4
−6
−8
−10
−12
−14
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANCZOS
NEWMARK

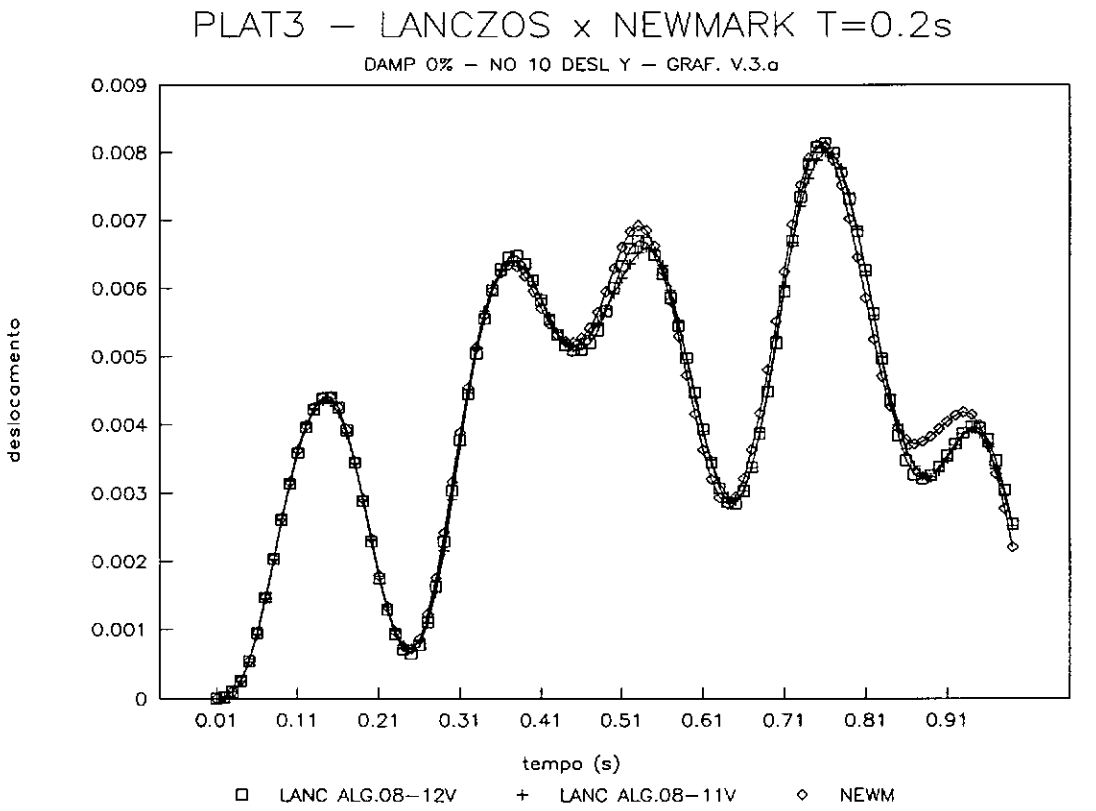
EXTENSÃO DAS ANÁLISES - PLAT3

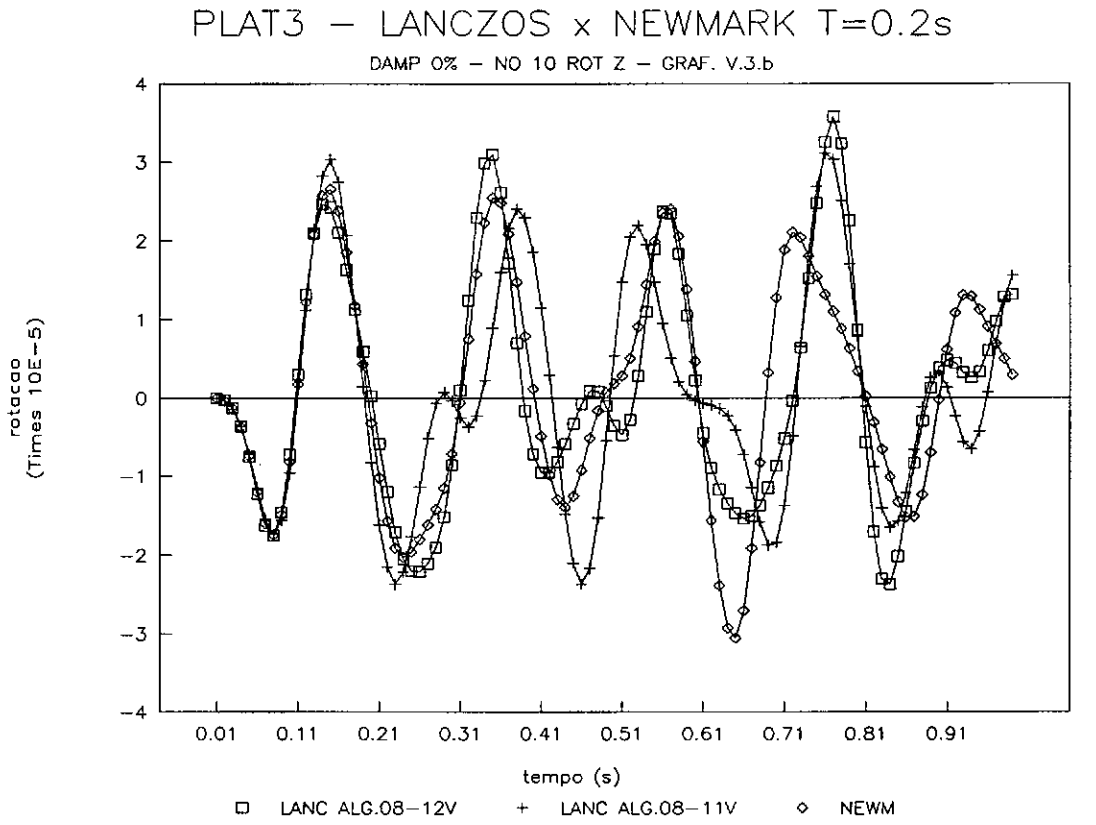
VALORES MÁXIMOS EM MÓDULO - $\bar{T}$=0.20s

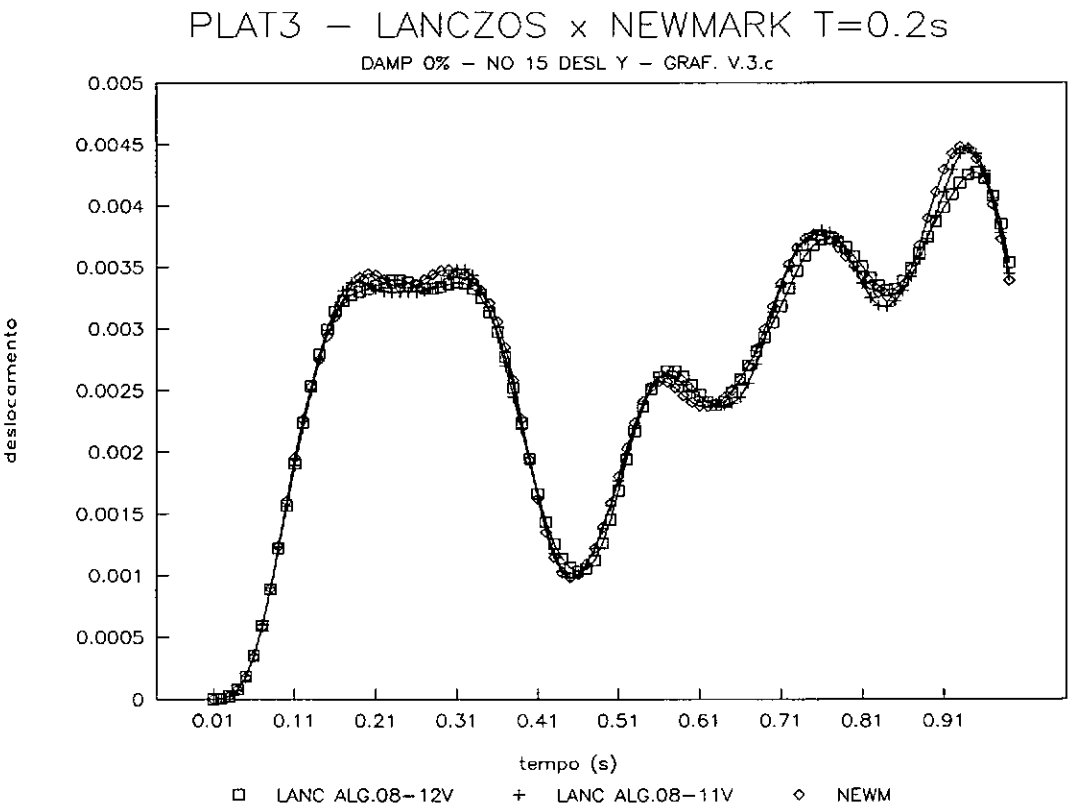
ALGORITMO 08 (11 MODOS)
x
ALGORITMO 08 (12 MODOS)
x
MÉTODO DE INTEGRAÇÃO DIRETA

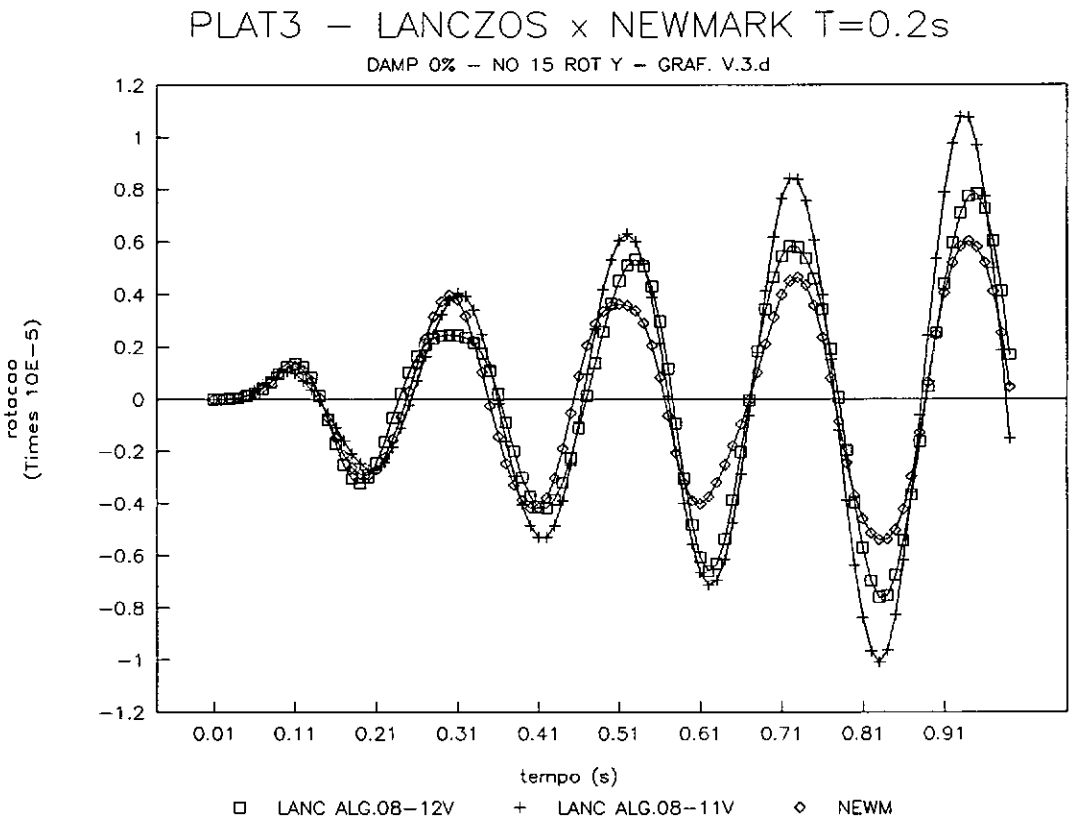
	NO	ALG.08 11 MODOS		ALG.08 12 MODOS		MET. DIRETO	
		DESL Y	ACEL Y	DESL Y	ACEL Y	DESL Y	ACEL Y
	1	.800E-2	.578E+0	.800E-2	.624E+0	-	-
	9	.789E-2	.210E+1	.786E-2	.201E+1	-	-
	10	.800E-2	.202E+1	.813E-2	.218E+1	.809E-2	.217E+1
	14	.427E-2	.793E+0	.424E-2	.804E+0	-	-
	15	.447E-2	.978E+0	.427E-2	.930E+0	.448E-2	.818E+0
	21	.718E-3	.298E+0	.669E-3	.247E+0	_	-
EL	NO	NX	QY	NX	QY	NX	QY
1	1	106.4	38.4	73.8	41.0	-	-
6	6	181.3	265.3	154.4	229.6	-	-
7	7	57.4	0.2	76.6	0.2	-	-
8	9	573.5	84.3	603.4	83.3	554.4	69.6
21	4	397.3	423.0	447.7	415.4	388.1	425.1
23	9	1045.0	169.8	920.2	168.9	-	-
		ERRO MEDIO	158.0	ERRO MEDIO	101.9		
		DESVIO	113.7	DESVIO	70.8		
		RESID (MAX)	235.0 0.84s	RESID (MAX)	178.0 0.74s	=>NÓ 15 DIR.Y	

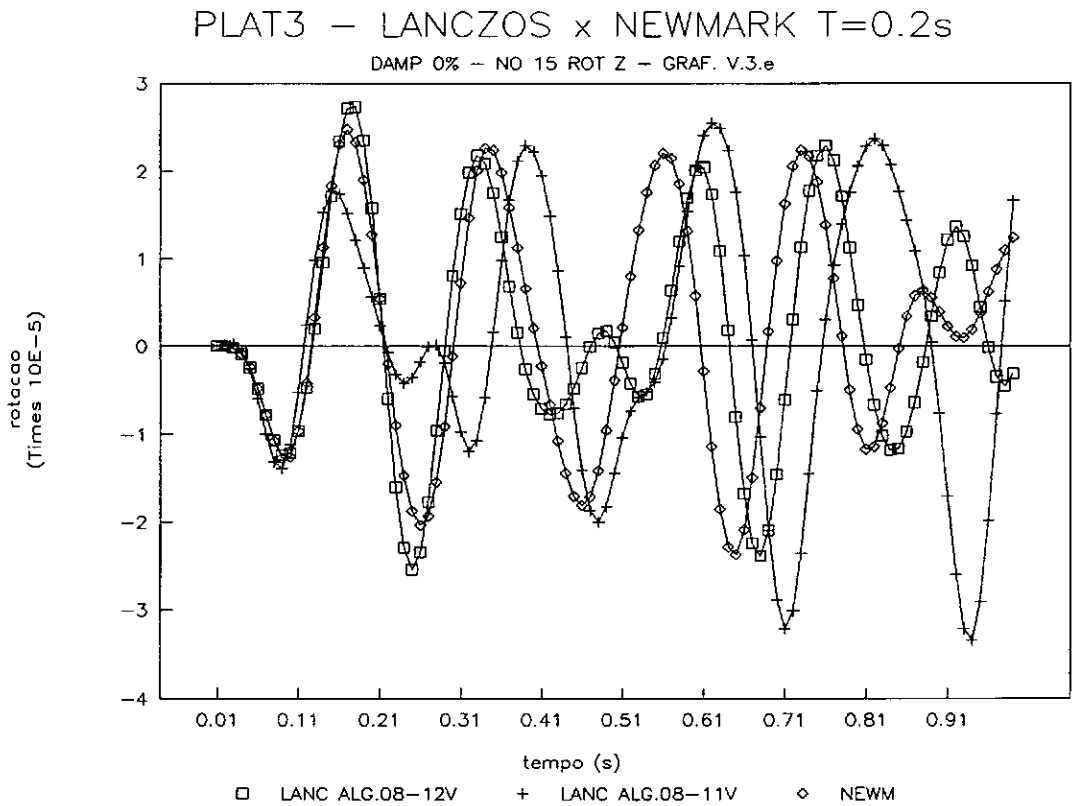
TABELA V.5

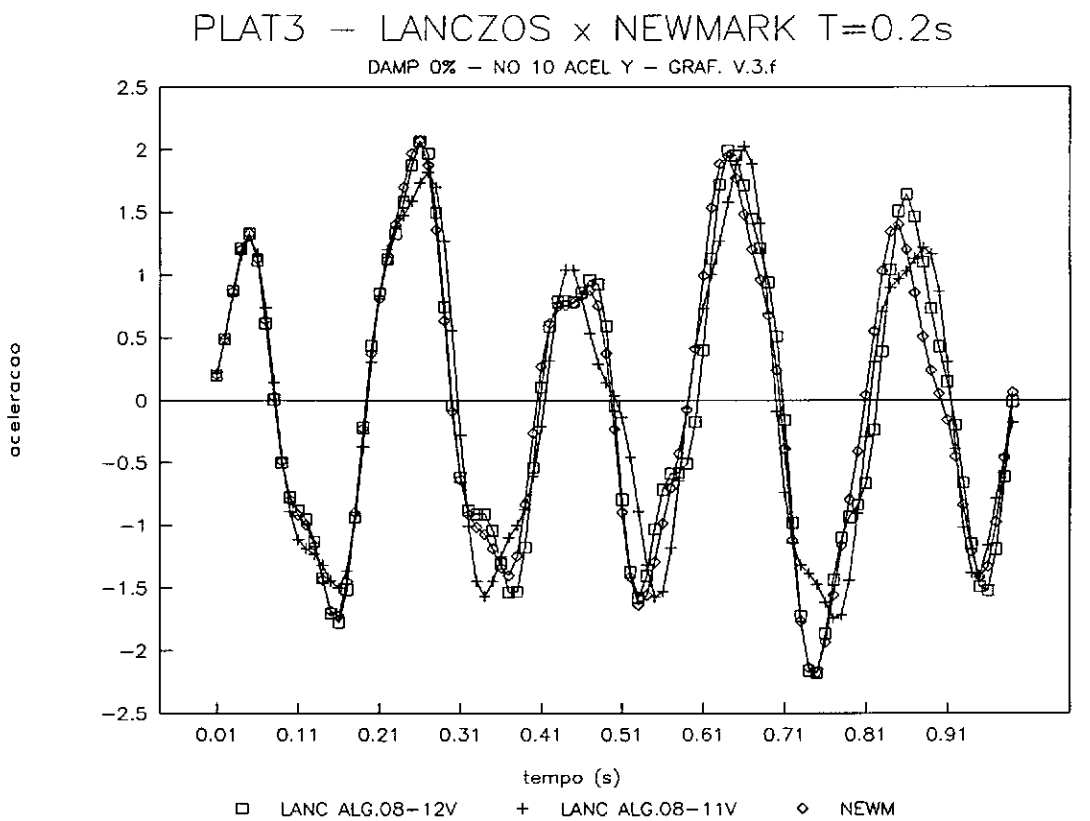

PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.2s
DAMP 0% – NO 10 DESL Y – GRAF. V.3.a
deslocamento
0.009
0.008
0.007
0.006
0.005
0.004
0.003
0.002
0.001
0
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANC ALG.08–12V
LANC ALG.08–11V
NEWM

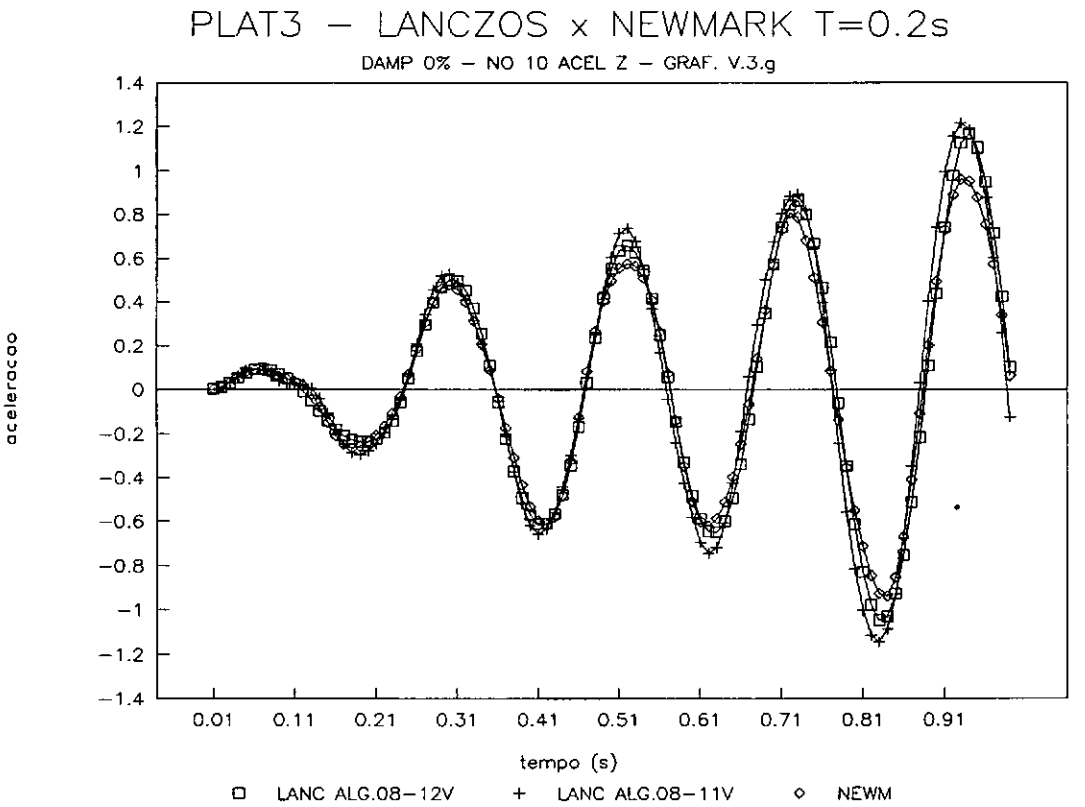

PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.2s
DAMP 0% – NO 10 ROT Z – GRAF. V.3.b
rotacao
(Times 10E–5)
4
3
2
1
0
–1
–2
–3
–4
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANC ALG.08–12V
LANC ALG.08–11V
NEWM

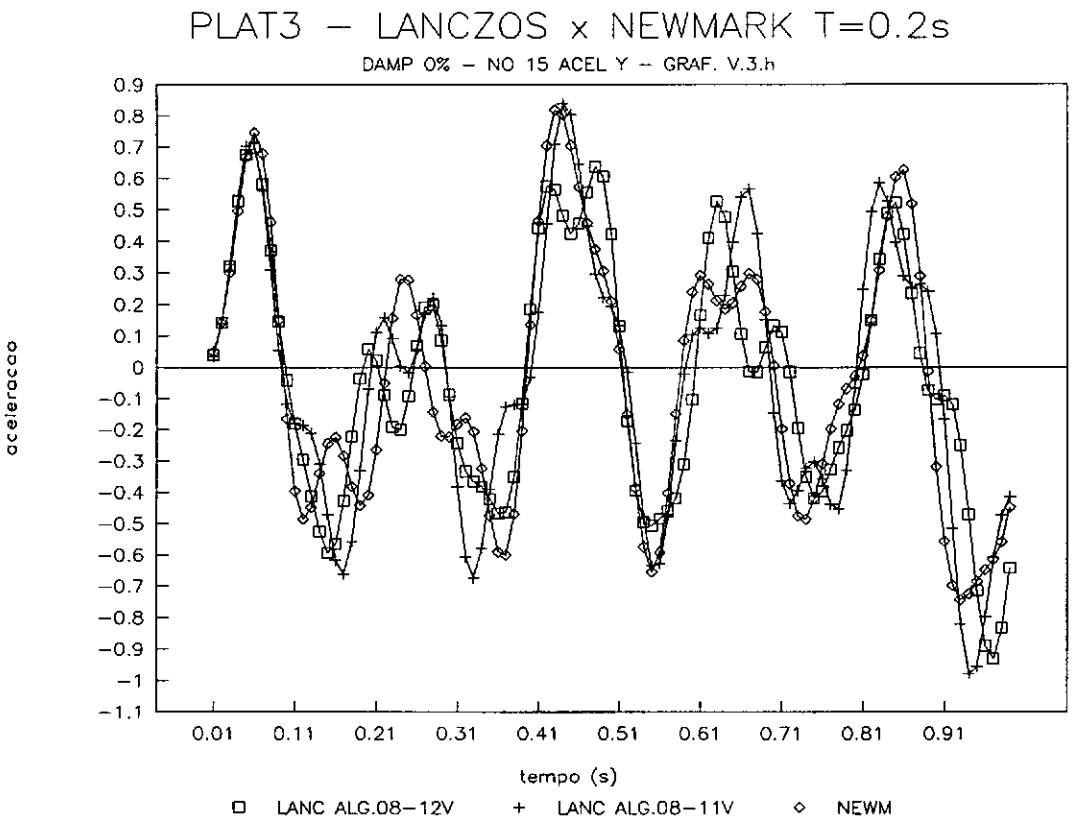

PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.2s
DAMP 0% – NO 15 DESL Y – GRAF. V.3.c
deslocamento
0.005
0.0045
0.004
0.0035
0.003
0.0025
0.002
0.0015
0.001
0.0005
0
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANC ALG.08–12V
LANC ALG.08–11V
NEWM

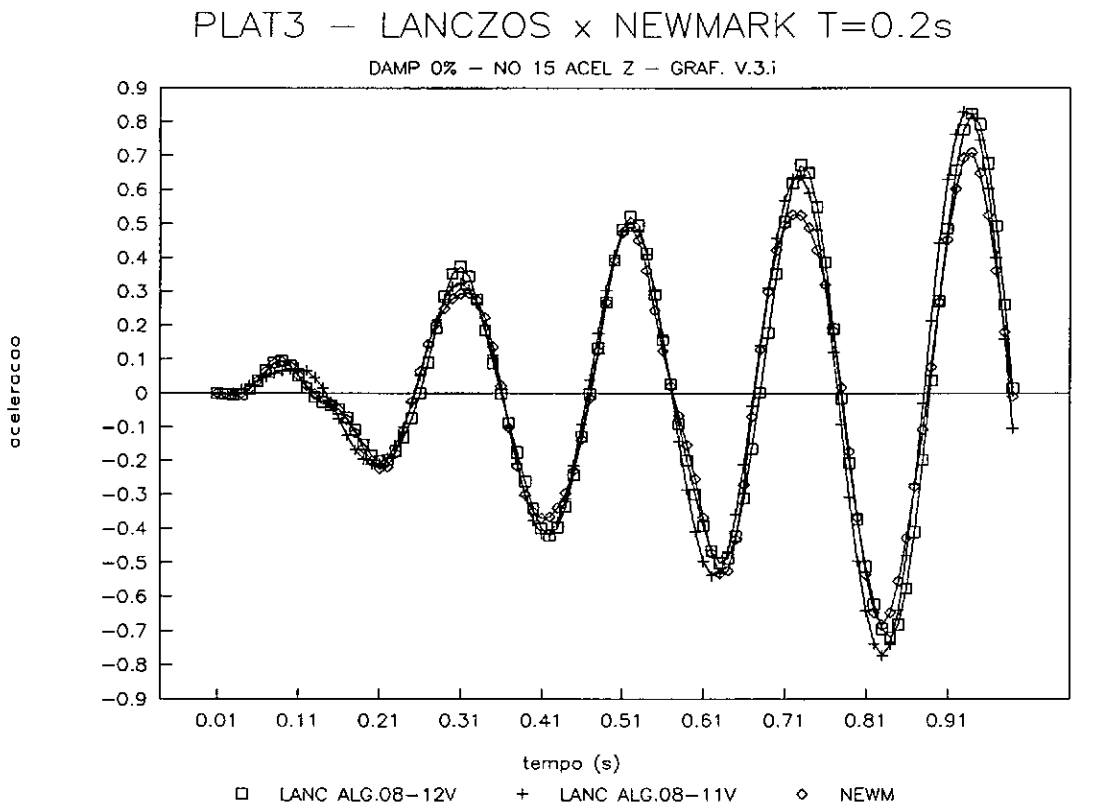

PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.2s
DAMP 0% – NO 15 ROT Y – GRAF. V.3.d
rotacao
(Times 10E–5)
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
–0.2
–0.4
–0.6
–0.8
–1
–1.2
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANC ALG.08–12V
LANC ALG.08–11V
NEWM

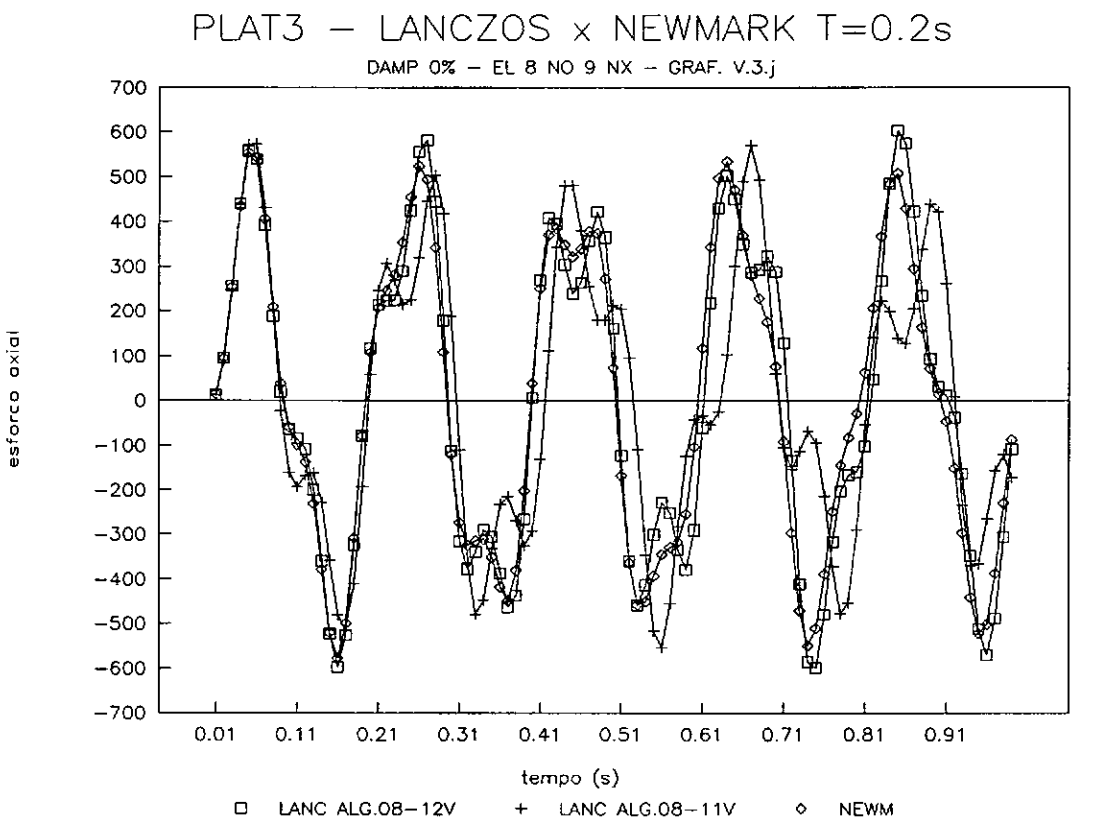

PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.2s
DAMP 0% – NO 15 ROT Z – GRAF. V.3.e
rotacao
(Times 10E-5)
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANC ALG.08-12V
LANC ALG.08-11V
NEWM

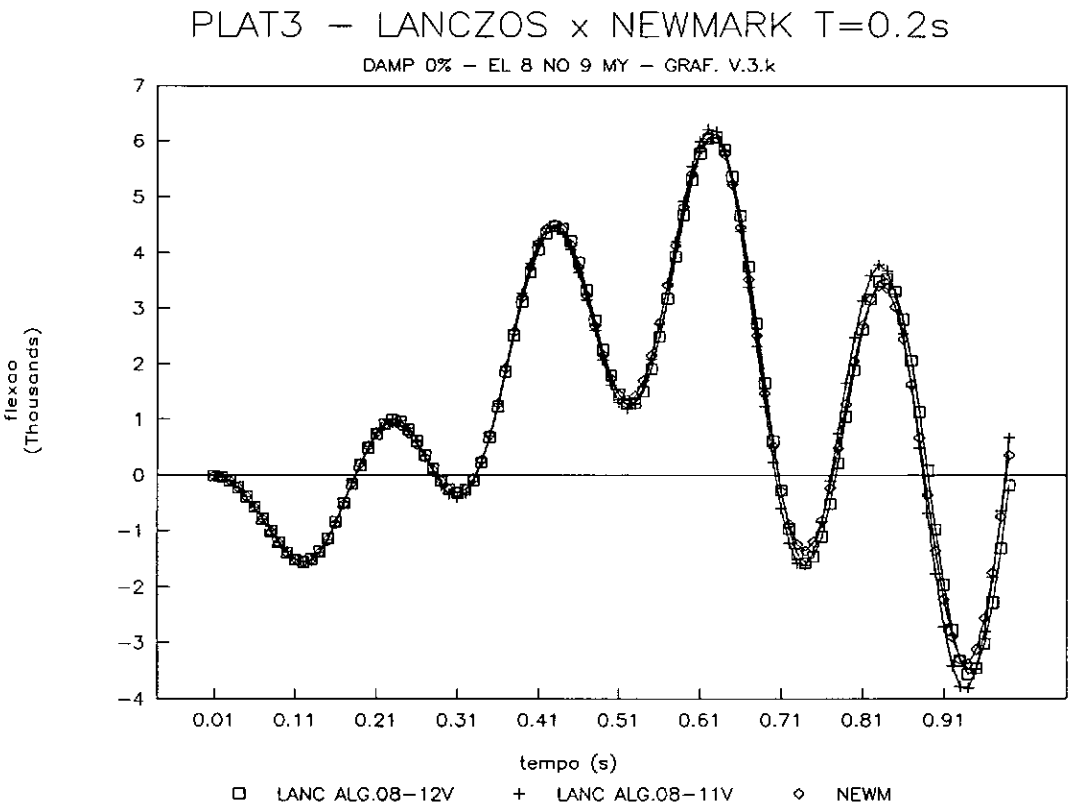

PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.2s
DAMP 0% – NO 10 ACEL Y – GRAF. V.3.f
aceleracao
2.5
2
1.5
1
0.5
0
-0.5
-1
-1.5
-2
-2.5
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANC ALG.08-12V
LANC ALG.08-11V
NEWM

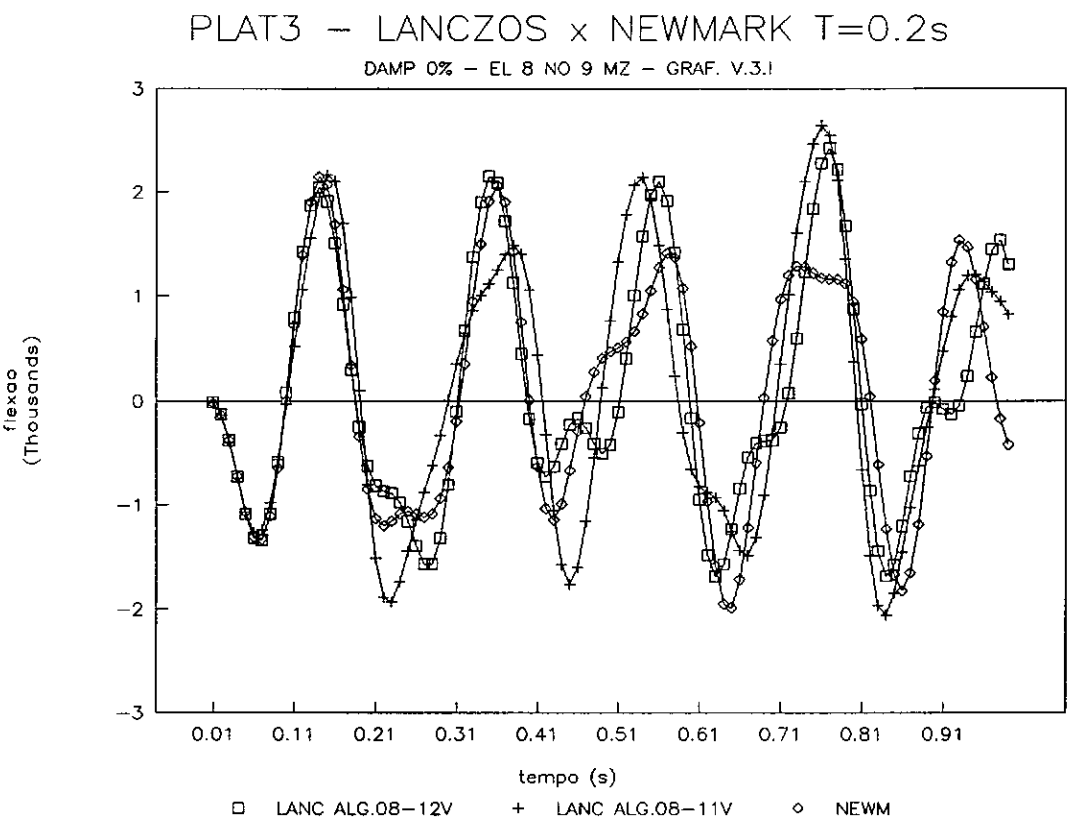

PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.2s
DAMP 0% – NO 10 ACEL Z – GRAF. V.3.g
aceleracao
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
−0.2
−0.4
−0.6
−0.8
−1
−1.2
−1.4
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANC ALG.08–12V
LANC ALG.08–11V
NEWM

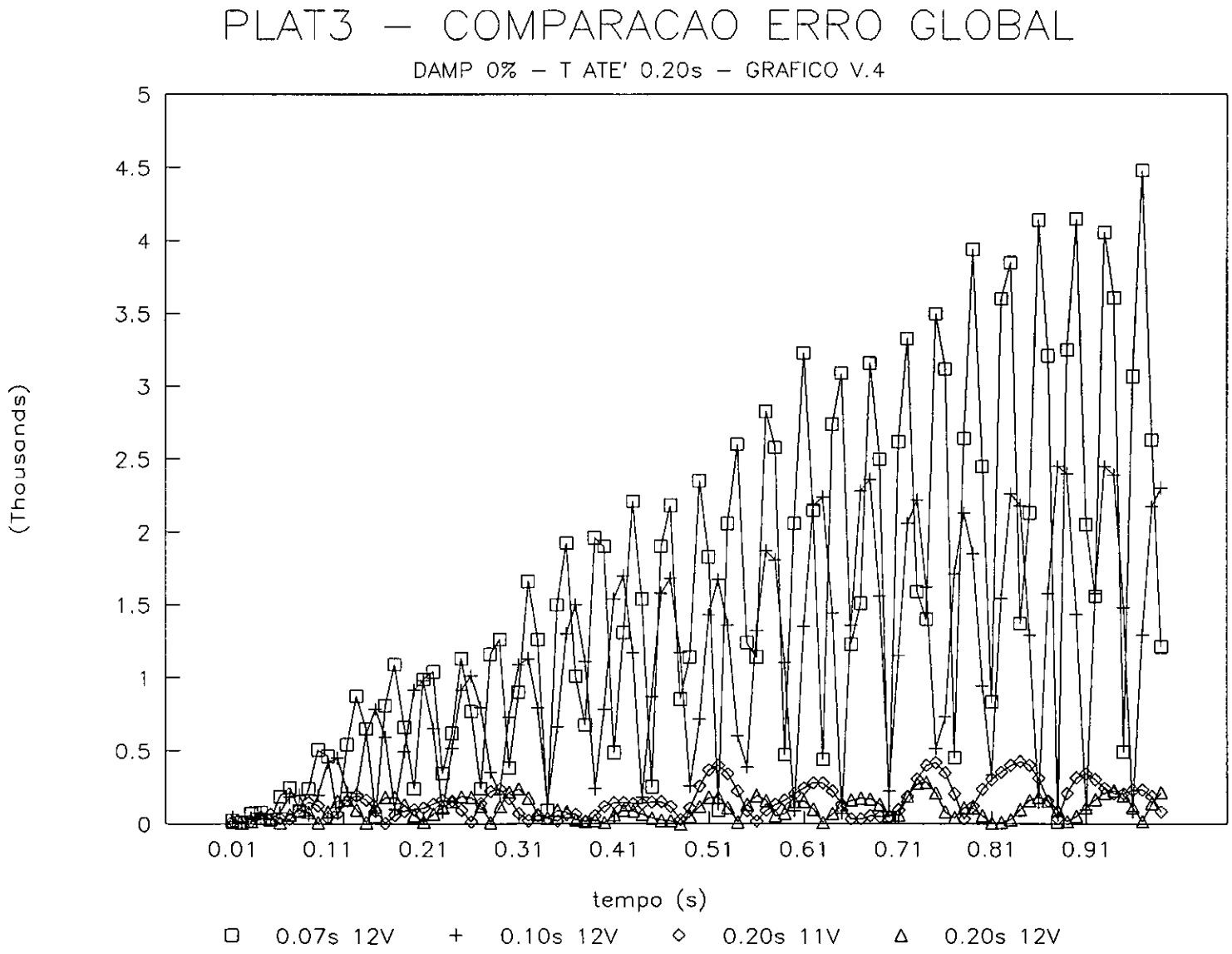

PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.2s
DAMP 0% – NO 15 ACEL Y – GRAF. V.3.h
aceleracao
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
−0.1
−0.2
−0.3
−0.4
−0.5
−0.6
−0.7
−0.8
−0.9
−1
−1.1
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANC ALG.08–12V
LANC ALG.08–11V
NEWM


PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.2s
DAMP 0% – NO 15 ACEL Z – GRAF. V.3.i
aceleracao
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
−0.1
−0.2
−0.3
−0.4
−0.5
−0.6
−0.7
−0.8
−0.9
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANC ALG.08–12V
LANC ALG.08–11V
NEWM


PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.2s
DAMP 0% – EL 8 NO 9 NX – GRAF. V.3.j
esforco axial
700
600
500
400
300
200
100
0
−100
−200
−300
−400
−500
−600
−700
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANC ALG.08–12V
LANC ALG.08–11V
NEWM


PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.2s
DAMP 0% – EL 8 NO 9 MY – GRAF. V.3.k
flexao (Thousands)
7
6
5
4
3
2
1
0
−1
−2
−3
−4
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANC ALG.08−12V
LANC ALG.08−11V
NEWM


PLAT3 – LANCZOS x NEWMARK T=0.2s
DAMP 0% – EL 8 NO 9 MZ – GRAF. V.3.l
flexao (Thousands)
3
2
1
0
−1
−2
−3
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
LANC ALG.08−12V
LANC ALG.08−11V
NEWM


PLAT3 – COMPARACAO ERRO GLOBAL
DAMP 0% – T ATE' 0.20s – GRAFICO V.4
(Thousands)
5
4.5
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
0.01
0.11
0.21
0.31
0.41
0.51
0.61
0.71
0.81
0.91
tempo (s)
0.07s 12V
0.10s 12V
0.20s 11V
0.20s 12V

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES FINAIS

Após os exemplos analisados, dentro dos objetivos desse estudo, podemos concluir que:

- Os parâmetros de erro (Erro Médio, Desvio do Erro e Resíduo Máximo) se mostraram confiáveis como indicadores da qualidade da resposta, desde que se leve em consideração o número de ciclos de carregamento analisados e o menor período modal atingido na análise. Apresentam como vantagem o aspecto da informação global (Erro Médio), dispersão da informação de erro ou evolução no tempo (Desvio do Erro) e informação localizada significativa (Resíduo Máximo). Isto permite uma avaliação direta da resposta, evitando que uma pesquisa em um determinado grau de liberdade induza a uma definição errônea da qualidade.

- Os períodos de excitação próximos aos últimos períodos modais devem ser evitados, uma vez que induzem a uma resposta de má qualidade. Deve ser mantida uma boa distância entre os últimos modos e o período da carga, porém é possível observar que esse distanciamento nem sempre é alcançado pelo Método de Superposição dos Modos de Lanczos, em virtude da pequena redução do valor do período modal a partir de um determinado número de vetores; o que pode ser constatado pelas TABELAS IV.2 e V.2.

- É recomendável o emprego de algoritmos com a utilização de um processo de ortogonalização plena da base. Esses algoritmos aumentam o esforço computacional, porém permitem o trabalho com um maior número de vetores na base. Isto resulta numa garantia de que não só os períodos modais, da solução do problema de autovalor, estejam bons, mas também que os esforços e deslocamentos estejam precisos. Assim, o programa que usar tal procedimento passa a ter uma flexibilidade maior na capacidade de resolver uma ampla gama de períodos de excitação. Outros processos de ortogonalização, tais como ortogonalização seletiva [12] ou re-ortogonalização parcial [14], também podem ser utilizados visando reduzir o esforço computacional necessário para a geração dos vetores.

- Para os baixos períodos de excitação as acelerações crescem bastante, enfatizando a parte da inércia na equação dinâmica e influenciando assim no erro apresentado e na comparação deste com esforços e deslocamentos em vista da solução pelo método direto. Ou seja, como o erro leva em conta as acelerações, e estas se apresentam muito elevadas, qualquer diferença no comportamento da aceleração acarreta diferença significativa no cálculo do resíduo. Como nossa preocupação principal é com esforços, nem sempre o crescimento do erro é enfatizado através dessa pesquisa na observação dos deslocamentos ou esforços.

Como exemplo, pode ser observado o comportamento da plataforma "TEAK", que apresenta uma quantidade alta de massa efetivamente envolvida na análise e alguns comportamentos de

Erro Médio e Resíduos diferentes da expectativa dos deslocamentos e esforços apresentados nos gráficos em comparação com a solução pelo Método Direto. Como confirmação do que foi dito, temos o exemplo contrário da PLAT3, que apresenta baixa massa efetiva (chegando a ter resíduos proporcionais aos resultados de esforços - ver Capítulo II).

- Uma apreciação númerica do Erro Médio, Desvio e Resíduo Maximo, do ponto de vista de garantia da boa qualidade da resposta, apresenta certas dificuldades:

  - defasagem para resposta em equilíbrio, porém com comportamento razoável;
  - número de ciclos analisados;
  - massa do modelo, sua distribuição e representação modal;
  - particularidades do modelo (molas, contatos, etc);e
  - período do carregamento (influência da aceleração).

Porém, além do valor do erro, a sua evolução ao longo do tempo, mostrando estabilidade ou não, também é importante.

Pode-se afirmar que para poucos ciclos (2 a 5 ciclos) de carga, Erros Médios maiores que ζ com Desvios do Erro elevado (próximo ao valor do Erro Médio, por exemplo), indicando grande dispersão nos valores, juntamente com o Máximo Resíduo elevado e tempo do resíduo próximo ao final dos ciclos (sugerindo crescimento do resíduo ao longo do tempo), apontam para uma resposta de má qualidade. Para os exemplos aqui realizados, pode-se afirmar que ζ situa-se na faixa de 15% da

soma das cargas em máxima amplitude.

Algumas modificações, para cálculo dos parâmetros de erro, podem ser implementadas de forma a reduzir o trabalho computacional. Por exemplo, a avaliação dos parâmetros de erro pode ser realizada nos últimos ciclos da análise, de forma a se obter as informações na região de maiores amplitudes, portanto, mais significativas.

Finalmente, cabe ressaltar que para períodos de excitação acima do período natural da estrutura, os procedimentos usuais (poucos modos, ortogonalização em relação aos 2 vetores anteriores, etc) não apresentam problemas para a solução dinâmica. Para períodos mais baixos, recomenda-se a utilização de um critério de parada rigoroso, associado a um algoritmo com estabilidade no processo de ortogonalização completa da base de vetores que permita atingir períodos modais que fiquem bastante distanciados do período de excitação, gerando uma base rica para solução do problema dinâmico. Essa distância deve ser de 3 a 5 modos para garantia de uma boa resposta.

Por outro lado, esses mecanismos de controle permitem estender um pouco mais a faixa de solução do método de superposição modal, observando que a utilização do Método Modal Clássico exigiria um elevado número de modos de vibração tornando inviável tal análise.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] COUTINHO, A.L.G.A., LANDAU, L., LIMA, E.C.P. EBECKEN,N.F.F., The Application of the Lanczos Mode Superposition Method in Dynamic Analysis of Offshore Structures, Computer & Structures, Vol 25, Nº4, pp. 615-625, 1987.

[2] JOO, K.J., WILSON, E.L., LEGER, P., Ritz Vectors and Generation Criteria for Mode Superposition Analysis, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 18, Nº 2, pp. 149-167, 1989.

[3] JOO, K.J., WILSON, E.L., An Adaptive Finite Element Technique for Structural Dynamics Analysis, Computers and Structures, Vol. 30, Nº6, pp. 1319-1339, 1988.

[4] LEGER, P., WILSON, E.L., Generation of Load Dependent Ritz Transformation Vectors in Structural Dynamics, Engineering Computation, Vol. 4, pp. 310-313, 1987.

[5] NOUR-OMID, B., CLOUGH, R.W., Dynamic Analysis of Structures Using Lanczos Coordinates, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 12, Nº 4, Pag. 565-577, 1984.

[6] COUTINHO, A.L.G.A., LANDAU, L., ALVES, J.L.D., LIMA, E.C.P., EBECKEN, N.F.F., An Improved Reduced Basis Technique for Dynamic Analysis of Offshore Structures, Offshore Engineering, Vol. 5, Editado por F.L.L.B.Carneiro, R.C.Batista e A.J.Ferrante, Pentech Press, London, pp. 514-530, 1986.

[7] COUTINHO, A.L.G.A., TORRES, A.L.F.L., LIMA, E.C.P., LANDAU, L., A Reduced Basis Technique for Dynamic Analysis of Offshore Structures in the Frequency Domain, Proceedings of 2ND International Conference Aided Design in Marine and Offshore Industries, Editado por T.K.S. Murthy, Springer-Verlag, 1986.

[8] BATHE, K.J., WILSON, E.J., Numerical Methods in Finite Element Analysis, Prentice-Hal, New Jersey, Capítulos 8 a 12, 1976.

[9] CLOUGH, R.W., PENZIEN, J., Dynamics of Structures, McGraw-Hill, Tokyo, Capítulo 27, 1975.

[10] VERITAS SESAM SYSTEM, SESAM - User's Manual versão 5, Hovik, 1989.

[11] FERREIRA, C.B., CASAPRIMA, E., VIDEIRO, P.M., Sistema de Análise Estrutural CHIP - SAECHIP - MANUAL DO USUÁRIO, Sistema desenvolvido a partir do trabalho apresentado para a cadeira de Técnicas Computacionais, COPPE/UFRJ, 1985.

[12] PARLETT, B.N., The Symmetric Eigenvalue Problem, Prentice-Hall, New Jersey, 1980.

[13] NOUR-OMID, B., The Lanczos Algorithm for Solution of Large Generalized Eigenproblems, The Finite Element Method, Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis, Editado por T.J.R.Hughes, Capítulo 10, Prentice-Hall, 1987.

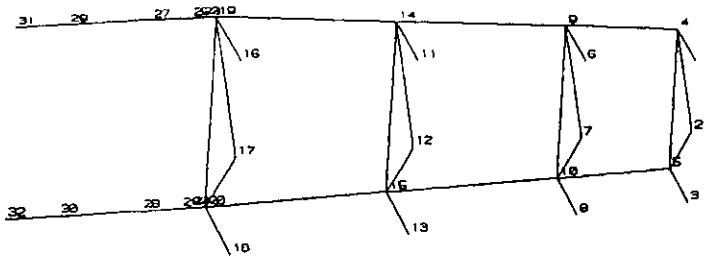
[14] SIMON, H.D., The Lanczos Algorithm with Partial Reorthogonalization, Mathematics of Computation, Vol. 42, nº 165, pp 115-142, 1984.

ANEXO "A"

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DOS MODELOS

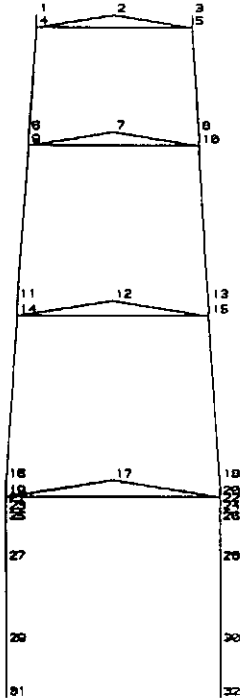
MODOS DE VIBRAÇÃO

SAECHIP/PLOT DATA 14/01/80 HORA 22:38:07
POST - PLAT3 PERIODO CARGA 3.0e LANCP
PERSPECTIVA

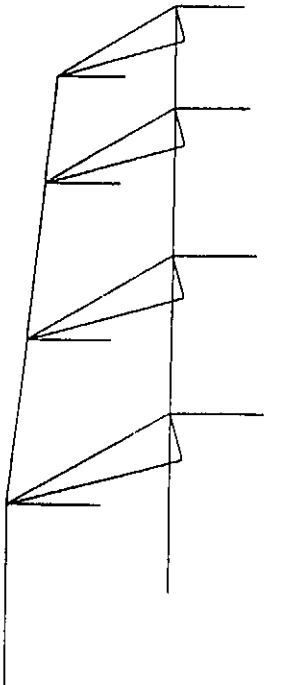


GEOMETRIA - PLAT3

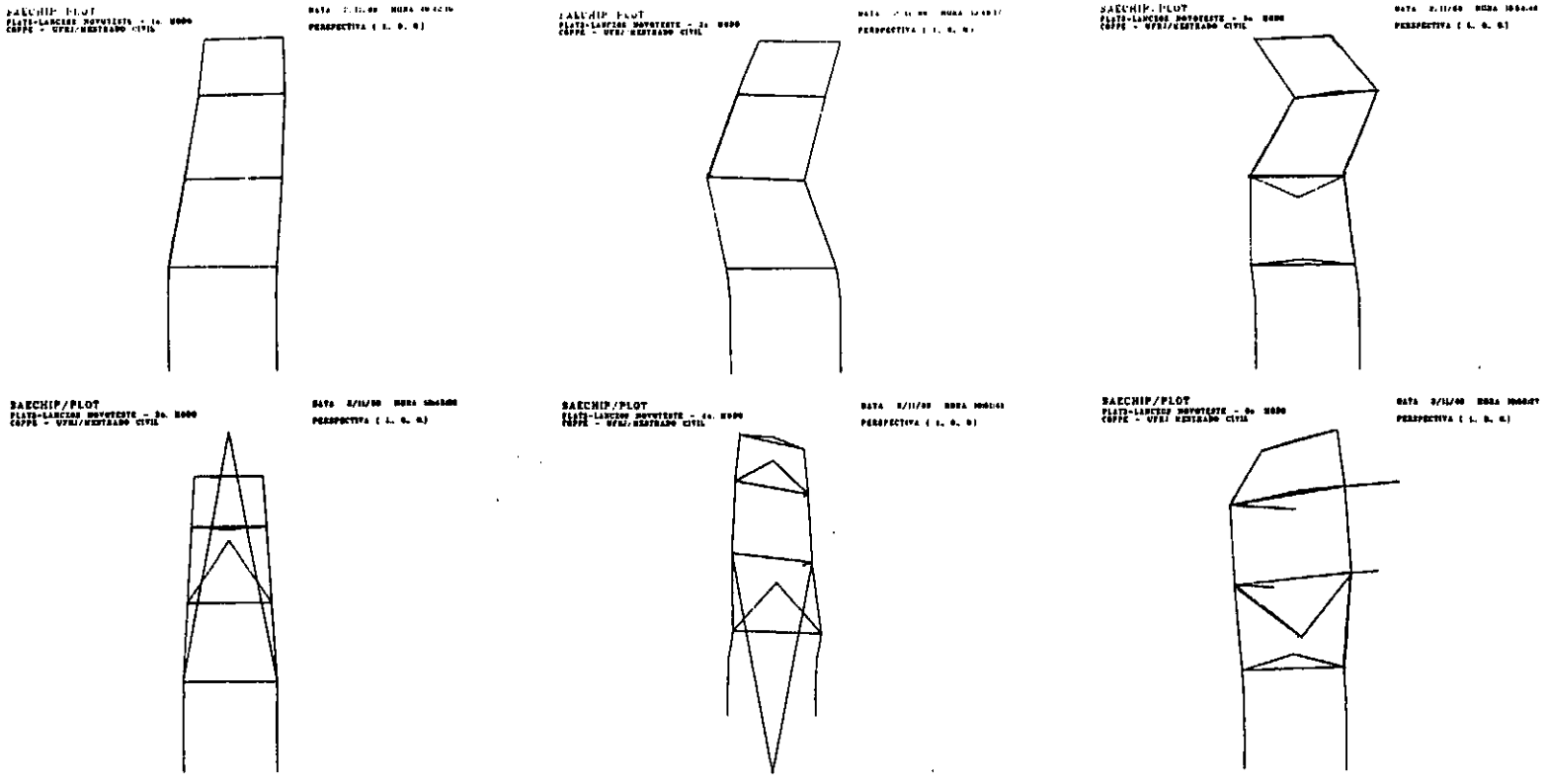
SAECHIP/PLOT DATA 14/01/89 HORA 22:15:03
POST - PLAT3 PERIODO CARGA 3.0s LANCP
FRONTAL



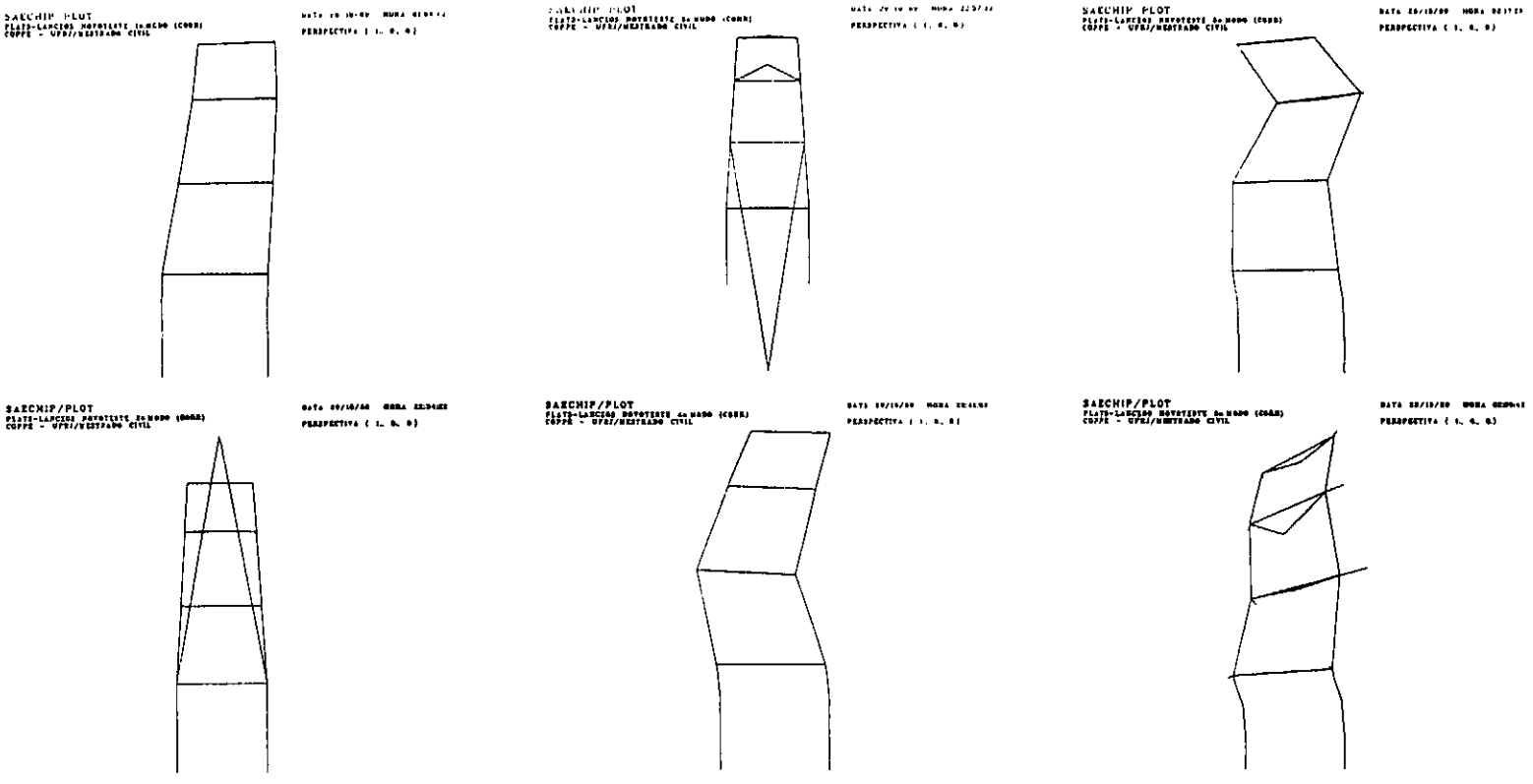
SAECHIP/PLOT DATA 14/01/89 HORA 22:16:29
POST - PLAT3 PERIODO CARGA 3.0s LANCP
PERSPECTIVA - ANGULO = 30.0



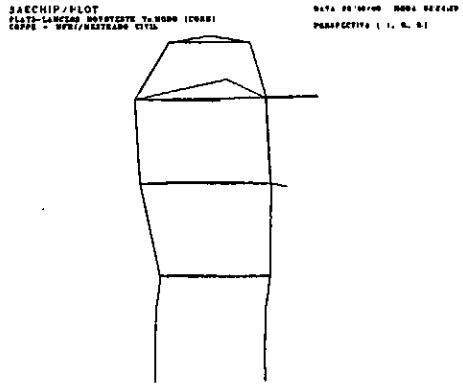
GEOMETRIA - PLAT3



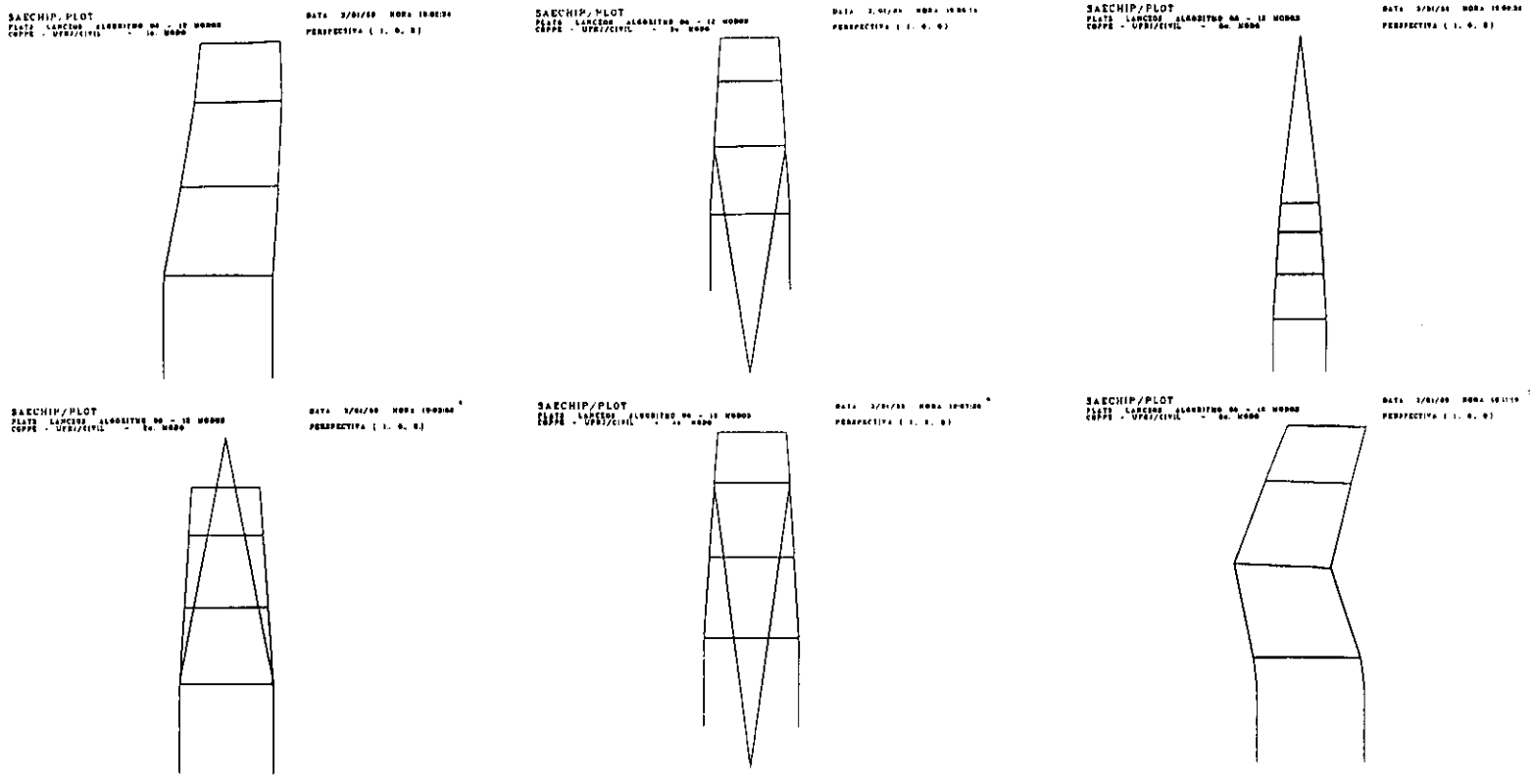
6 MODOS (SEM CORREÇÃO)



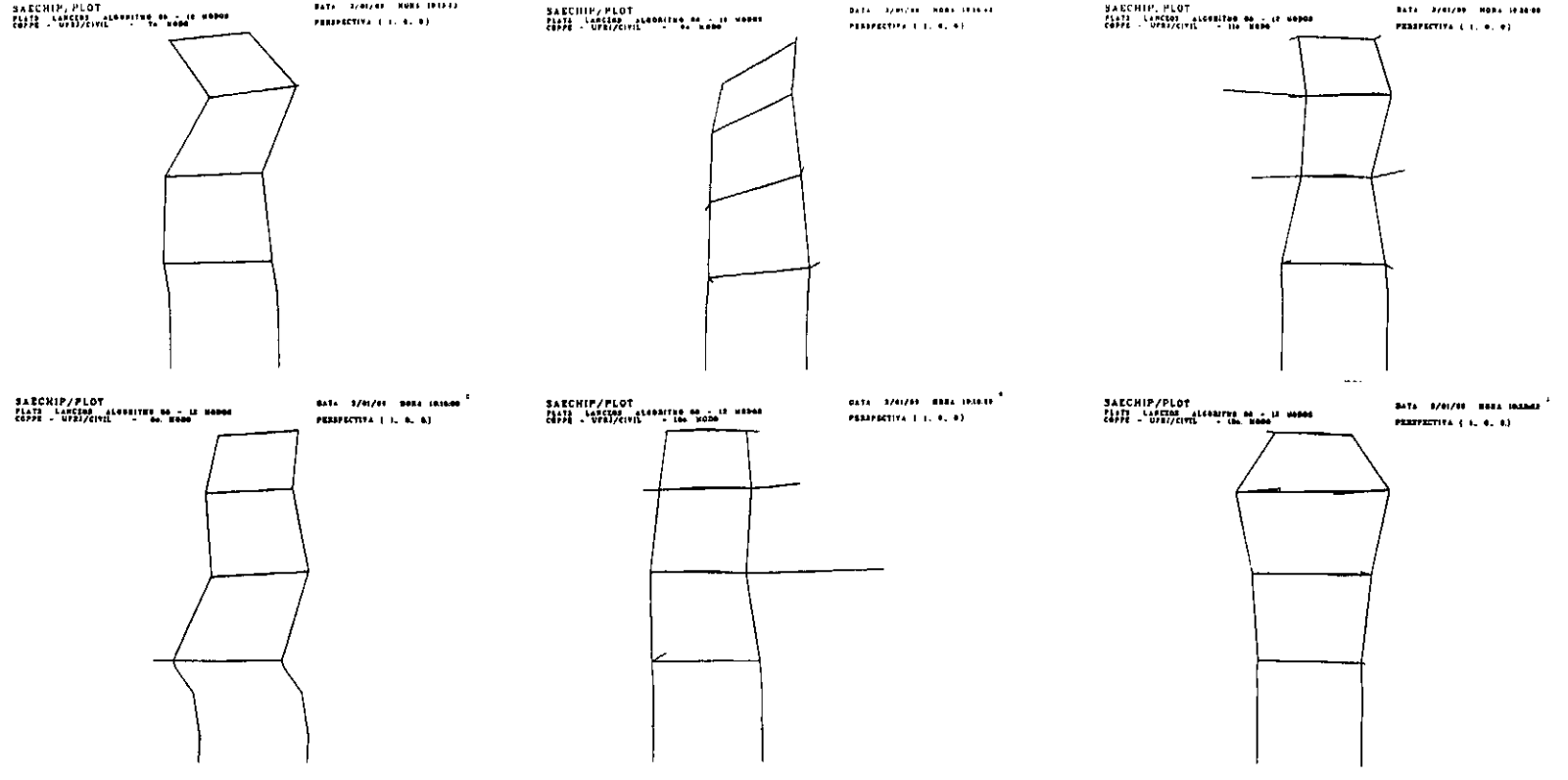
7 MODOS (COM CORREÇÃO - 5% ERRO)



7 MODOS (COM CORREÇÃO - 5% ERRO)



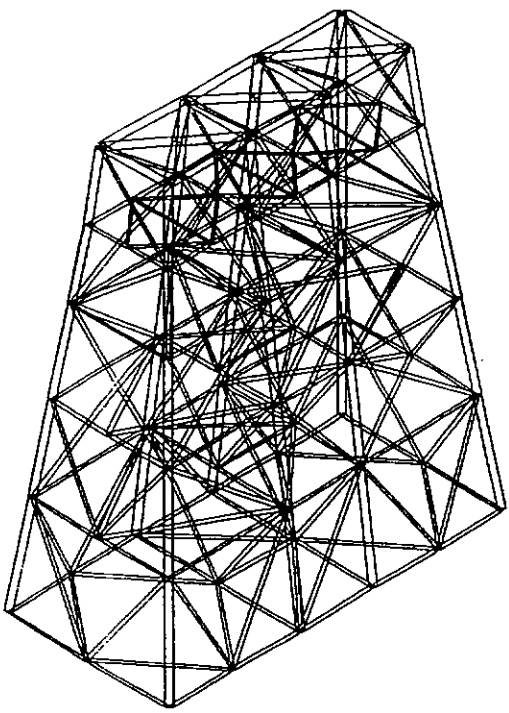
12 MODOS (ALGORITMO 08)



12 MODOS (ALGORITMO 08)

SAECHIP PLOT
TEAK - LANCZOS MODIF. 5/10% ERRO
UFRJ - COPPE ENGENHARIA CIVIL

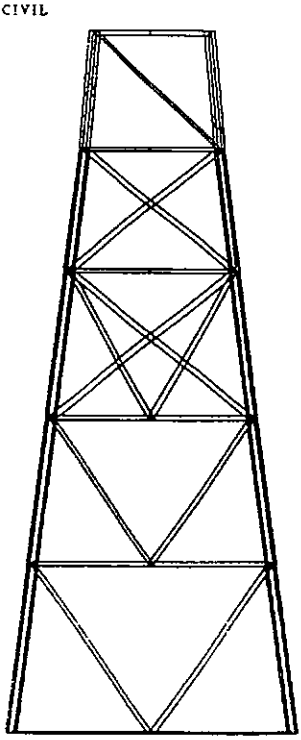
DATA 4/11/89 HORA 22:38:52
PERSPECTIVA (1., 1., 1.)



GEOMETRIA - TEAK

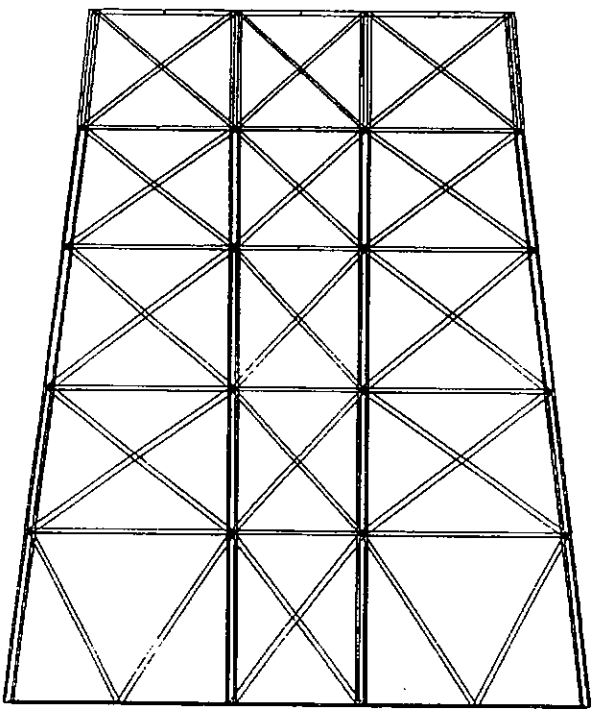
SAECHIP/PLOT
TEAK - LANCZOS MODIF. 5/10% ERRO
UFRJ - COPPE ENGENHARIA CIVIL

DATA 4/11/89 HORA 22:42:40
PERSPECTIVA (1., 0., 0.)



SAECHIP/PLOT
TEAK - LANCZOS MODIF. 5/10% ERRO
UFRJ - COPPE ENGENHARIA CIVIL

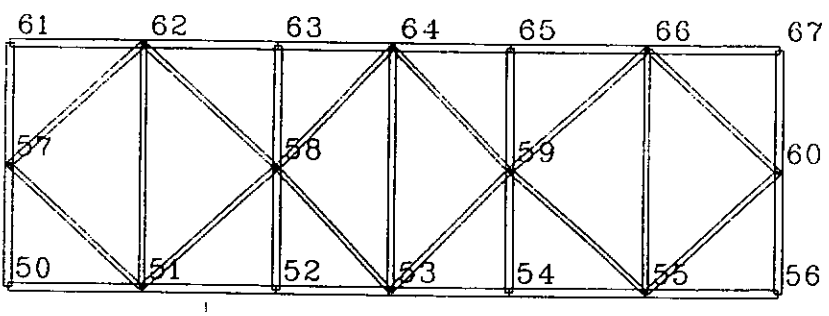
DATA 4/11/89 HORA 22:41:24
PERSPECTIVA (0., 1., 0.)



GEOMETRIA - TEAK

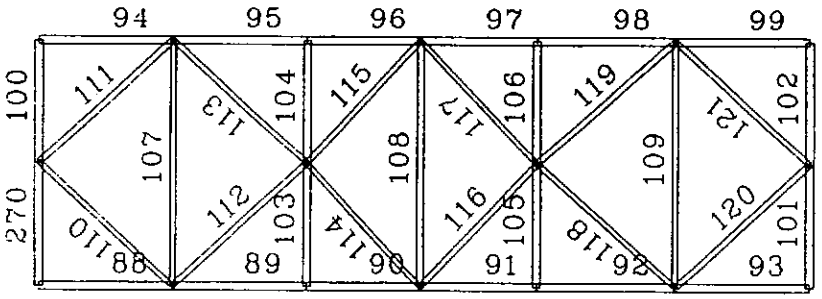
SAECHIP/PLOT
TEAK - LANCZOS MODIF. 5/10% ERRO
UFRJ - COPPE ENGENHARIA CIVIL

DATA 2/11/89 HORA 23:41:27
JAQUETA ELEV. 2412



SAECHIP/PLOT
TEAK - LANCZOS MODIF. 5/10% ERRO
UFRJ - COPPE ENGENHARIA CIVIL

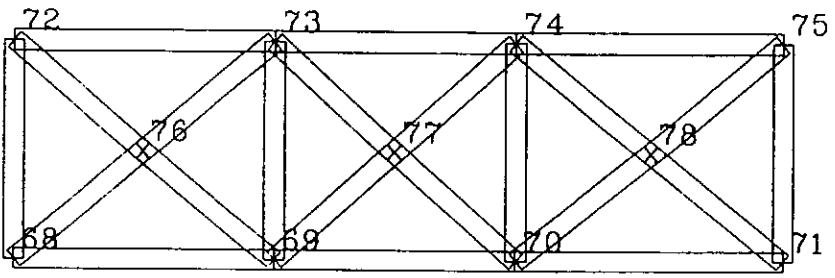
DATA 2/11/89 HORA 23:40:12
JAQUETA ELEV 2412



GEOMETRIA - TEAK

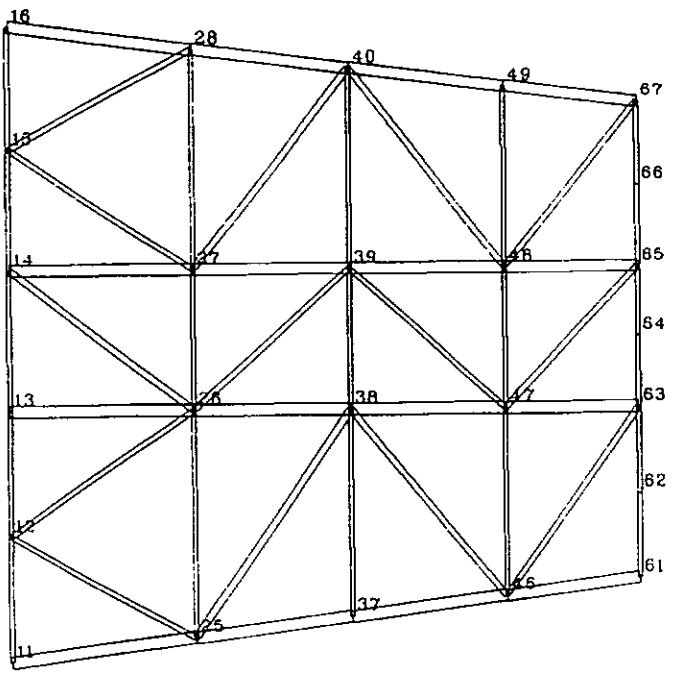
SAECHIP/PLOT
TEAK - LANCZOS MODIF. 5/10% ERRO
UFRJ - COPPE ENGENHARIA CIVIL

DATA 2/11/89 HORA 23:43:39
CONVES ELEV. 2910

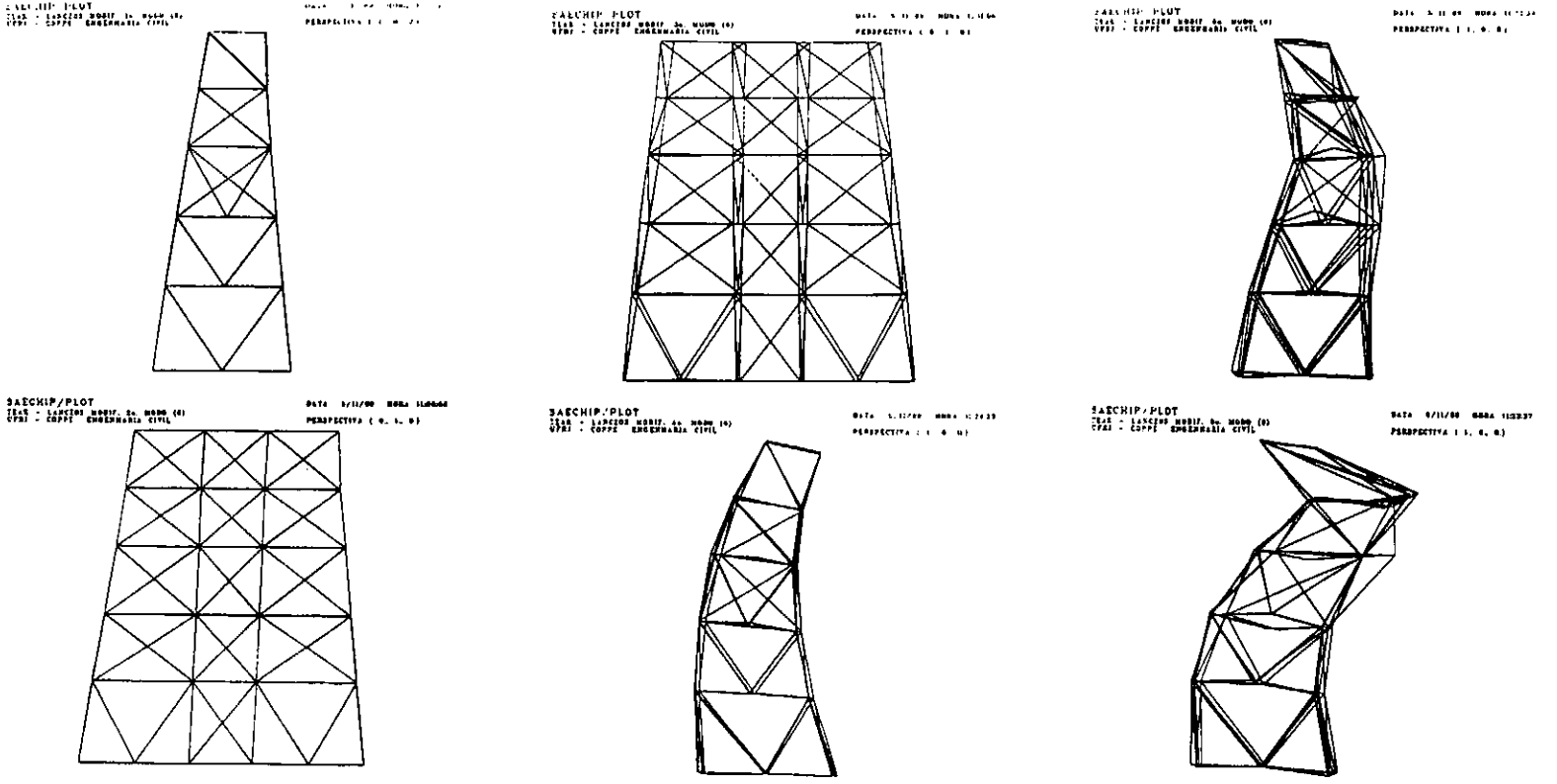


SAECHIP PLOT
TEAK - LANCZOS MODIF. 5/10% ERRO
UFRJ - COPPE ENGENHARIA CIVIL

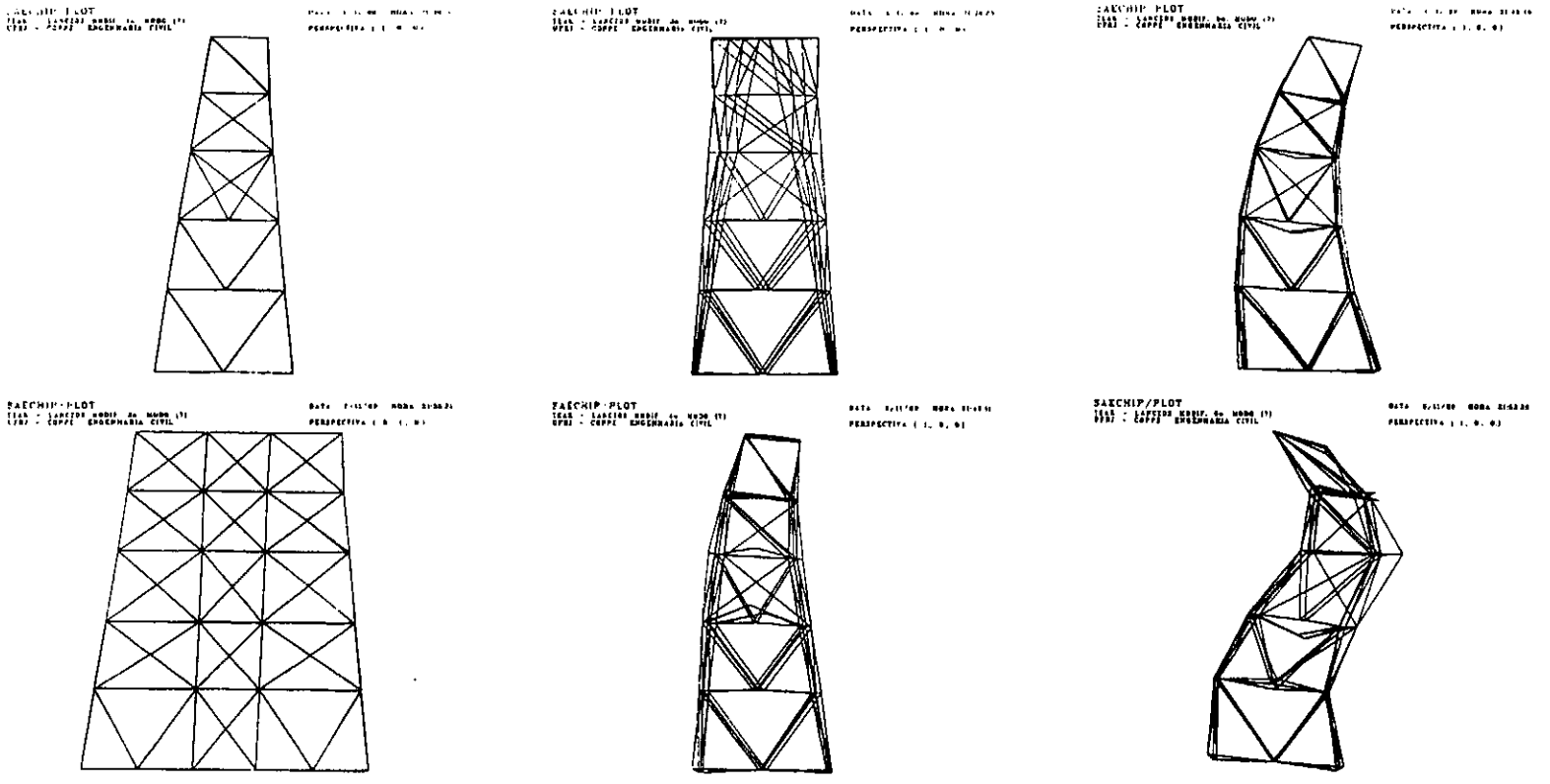
DATA 2/11/89 HORA 00:31:53
JAQUETA ELEV. "B"



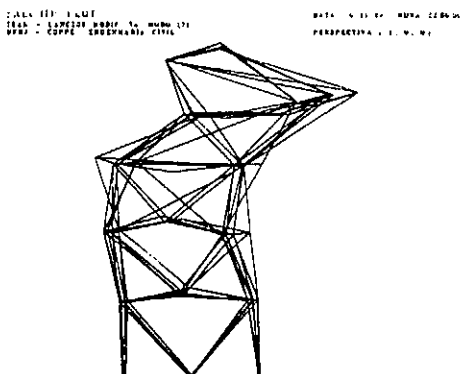
GEOMETRIA - TEAK



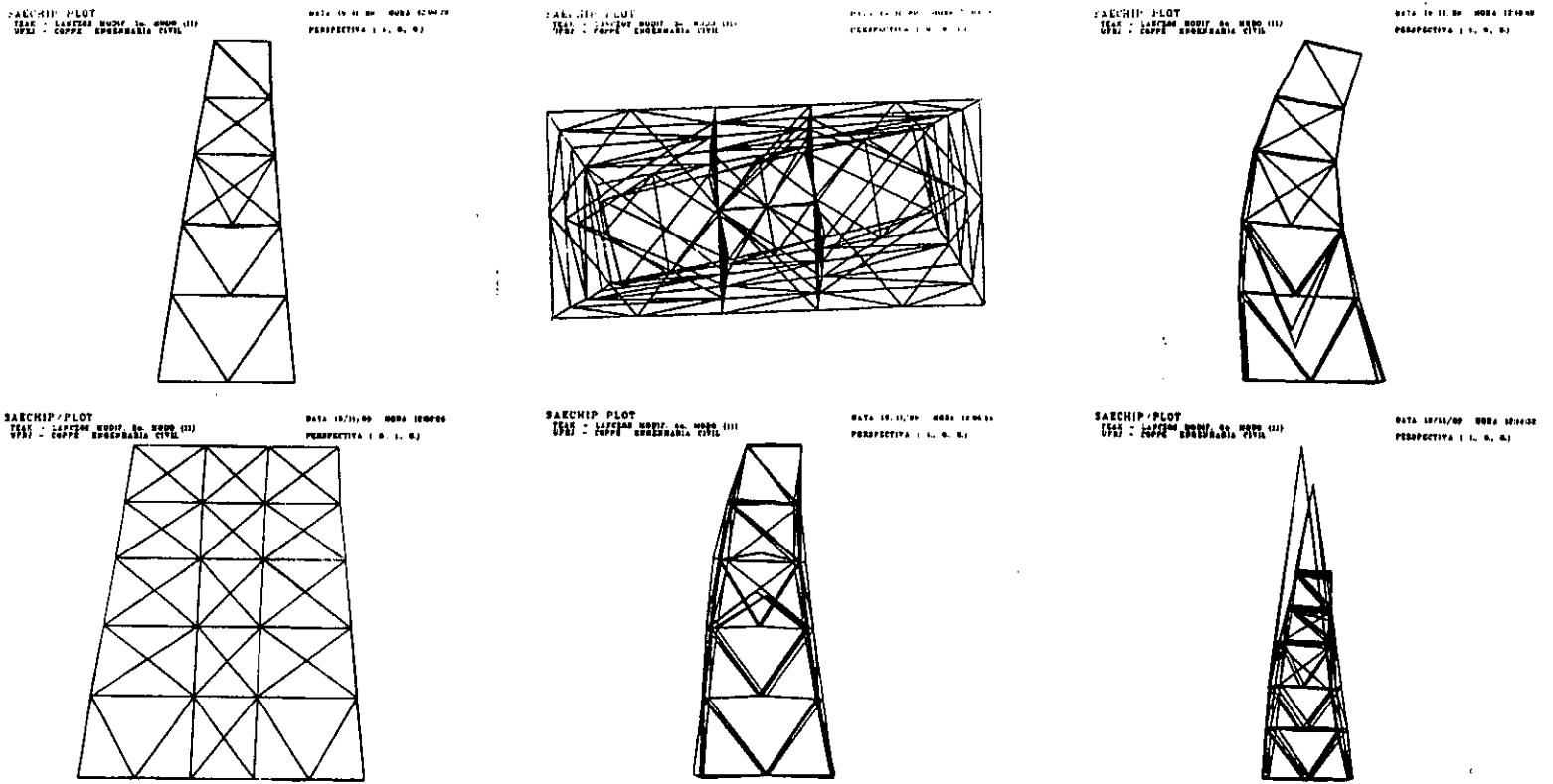
6 MODOS (SEM CORREÇÃO)



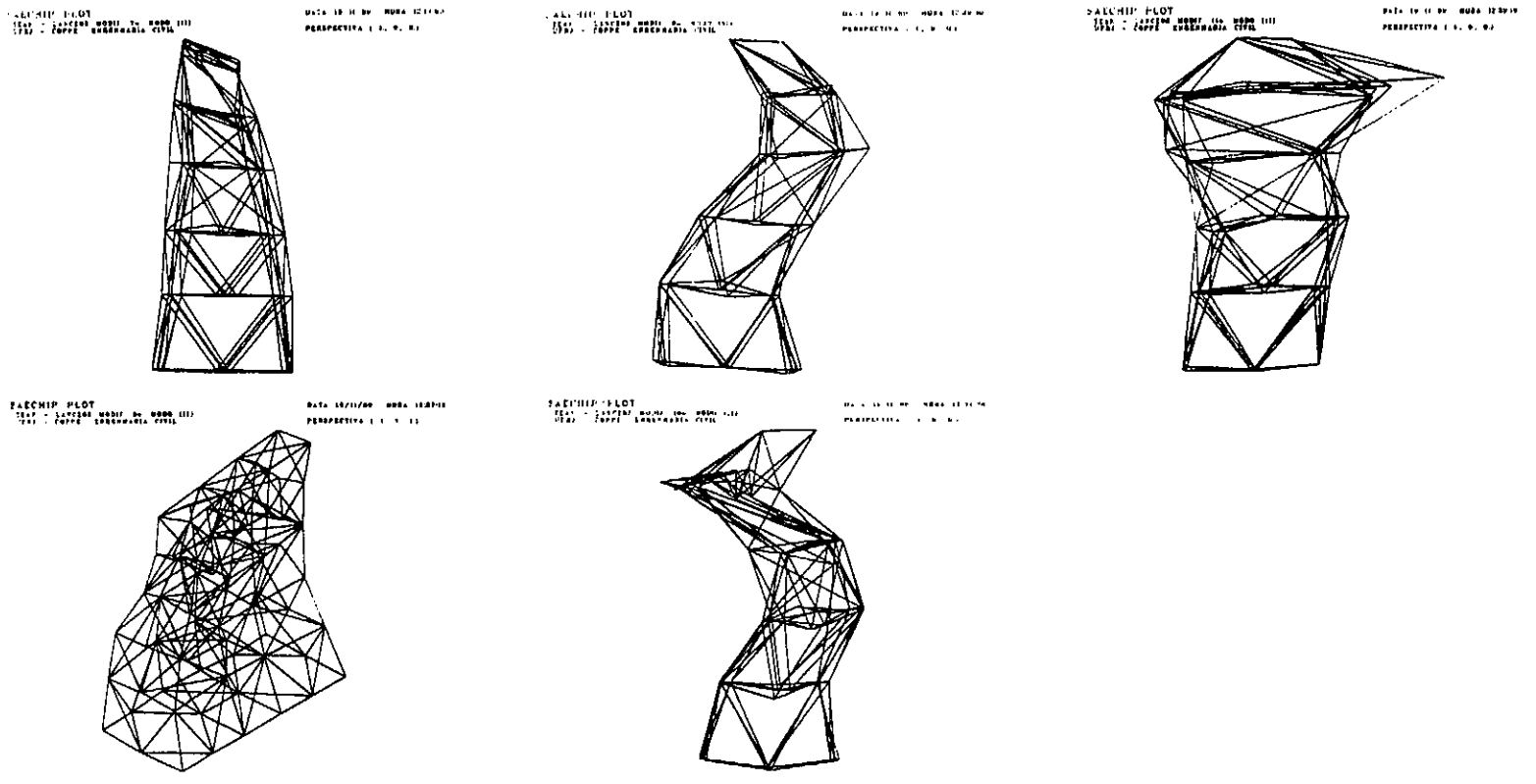
7 MODOS (COM CORREÇÃO - 5% ERRO)



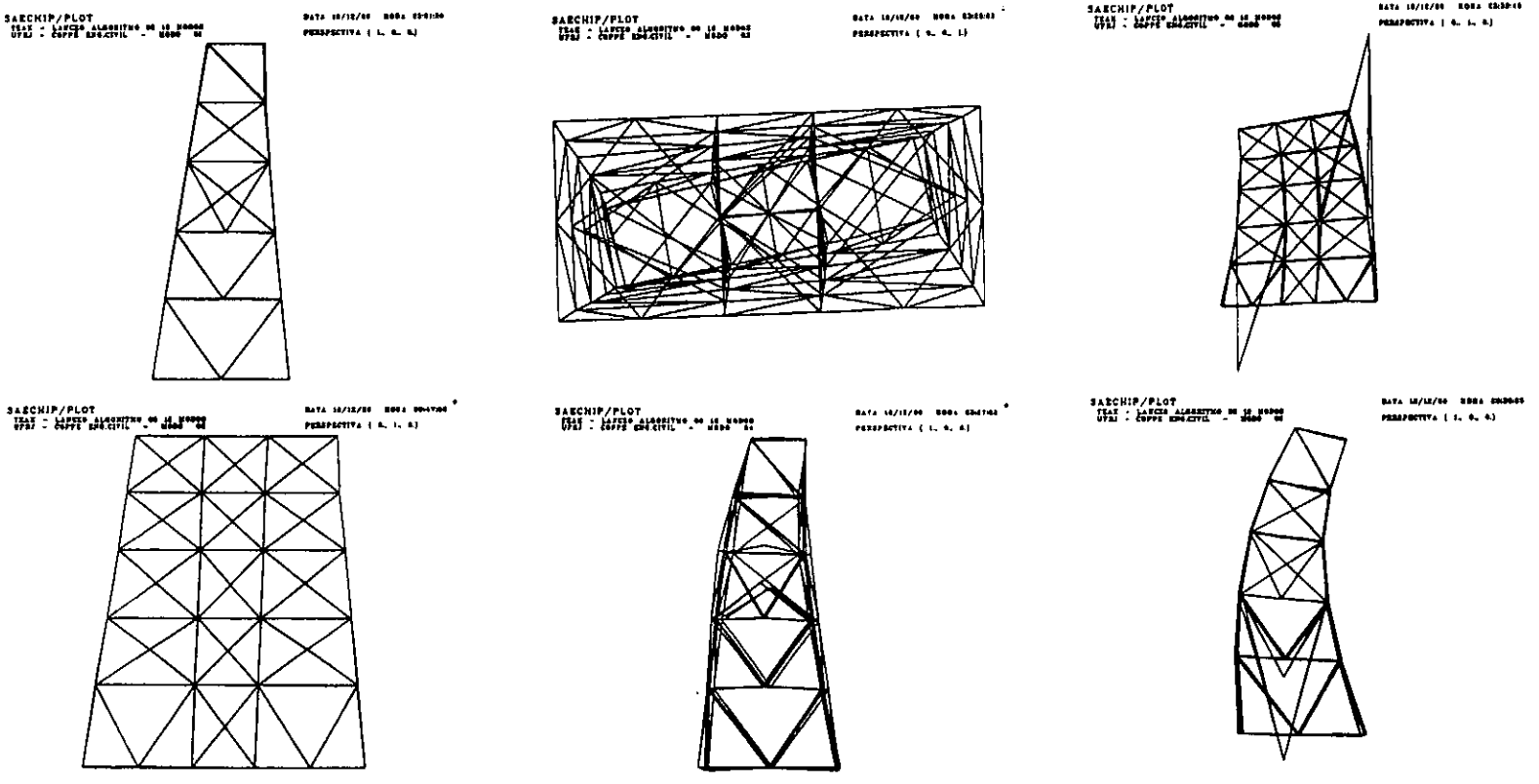
7 MODOS (COM CORREÇÃO - 5% ERRO)



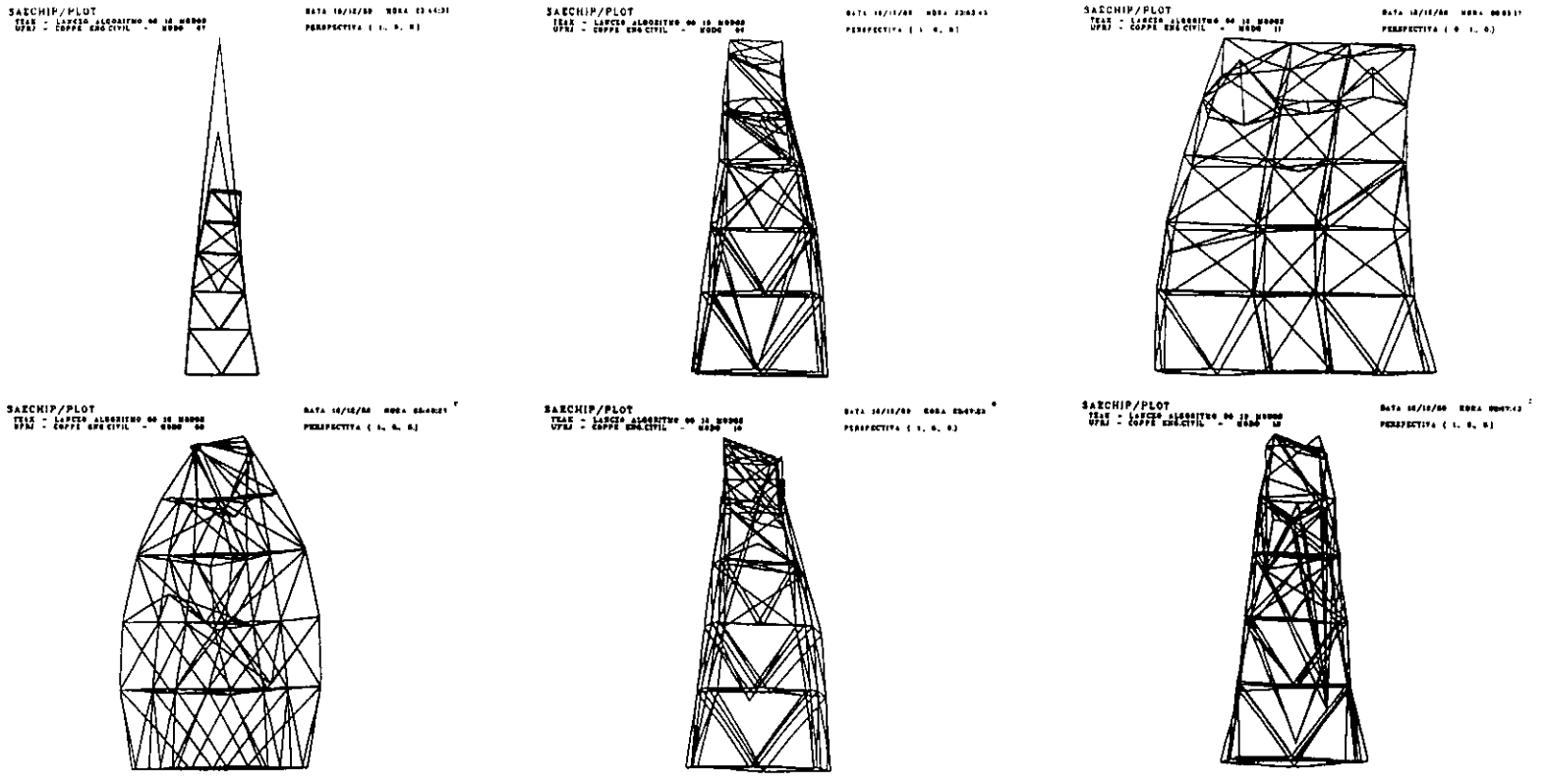
11 MODOS (COM CORREÇÃO "HP")



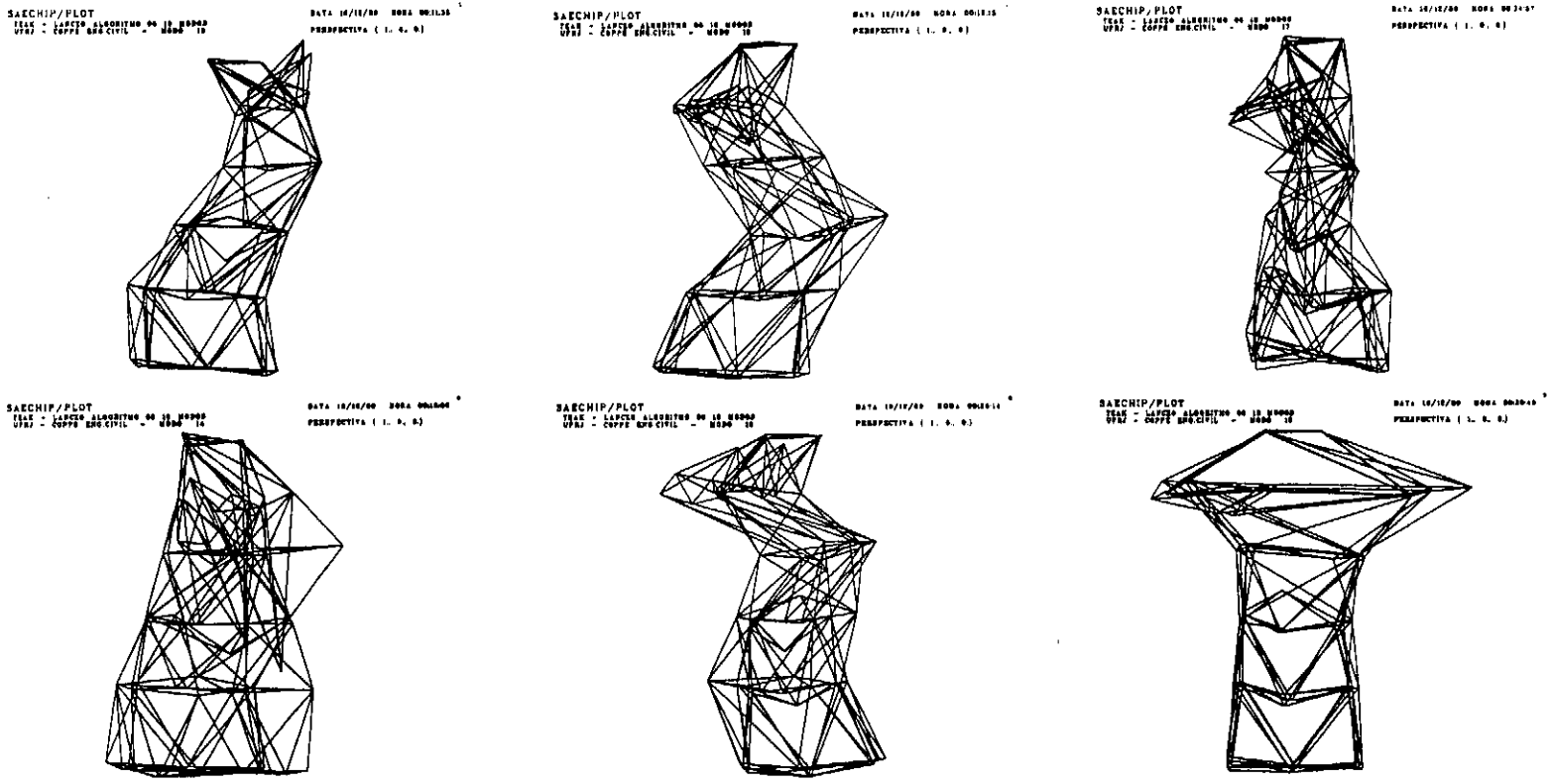
11 MODOS (COM CORREÇÃO "HP")



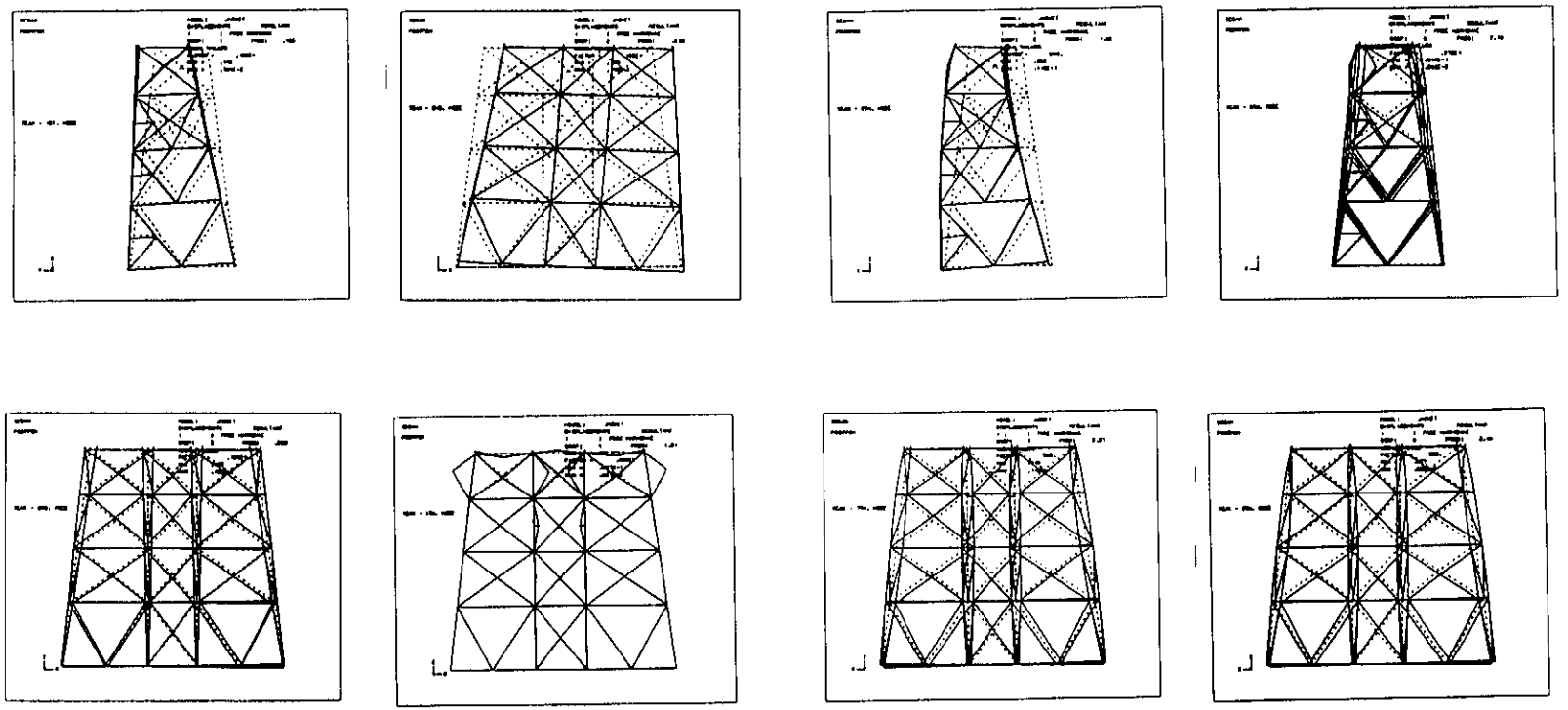
18 MODOS (ALGORITMO 08)



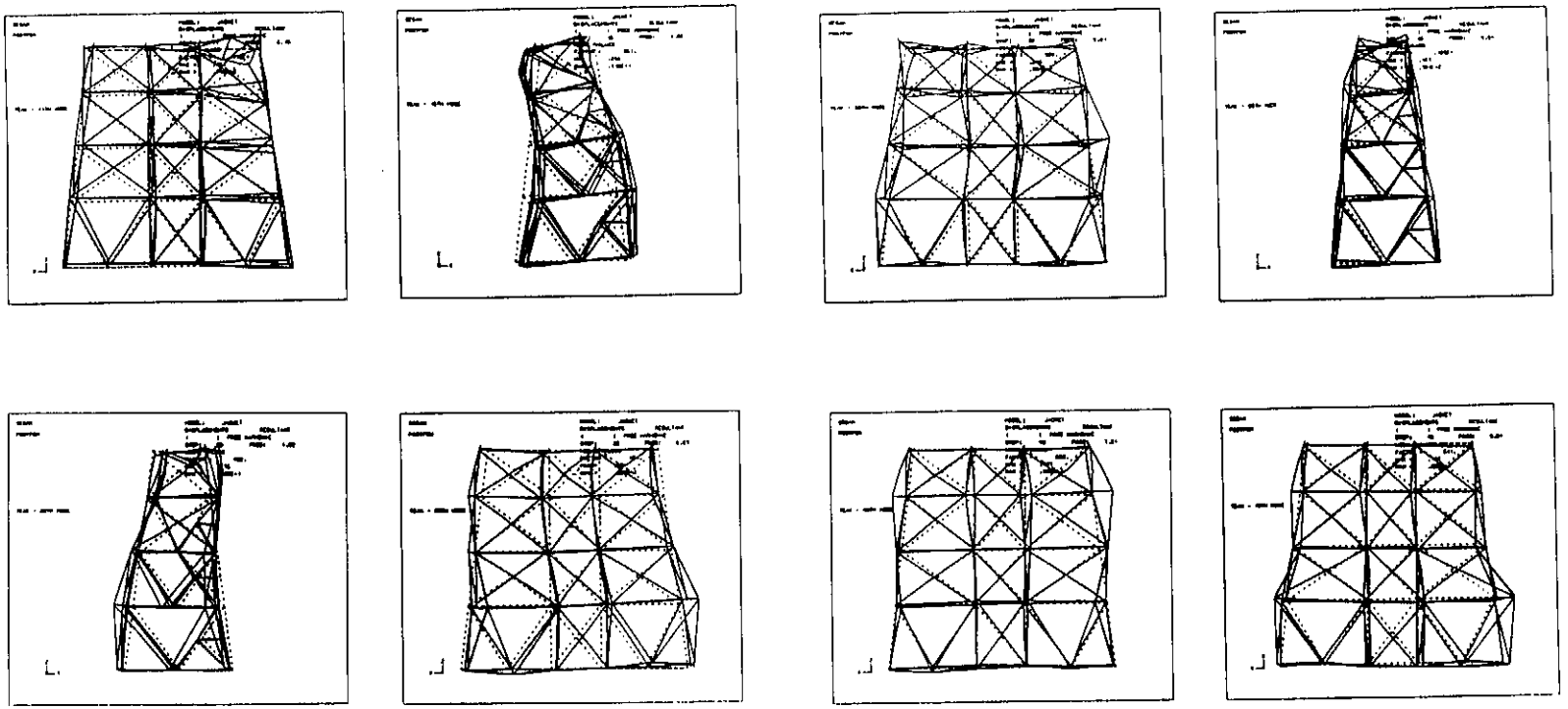
18 MODOS (ALGORITMO 08)



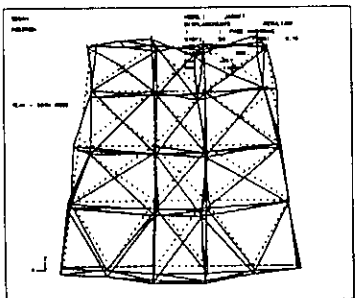
18 MODOS (ALGORITMO 08)



MODOS SESAM



MODOS SESAM



MODOS SESAM